



Διερεύνηση σκοπιμότητας
επένδυσης για την κατασκευή και
λειτουργία μονάδας παραγωγής
ενέργειας από βιοαέριο

Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας

Επιβλέπων: Κηρυττόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κηρυττόπουλο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Ξενοφώντα Κακάτσιο καθώς και τον κ. Χαράλαμπο Μαλανδράκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους σε διάφορα θέματα που προέκυψαν κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Χαϊμαλάς Άγγελος

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	9
1.1	Πλαίσιο.....	9
1.2	Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι.....	9
1.3	Οριοθέτηση.....	9
2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	10
2.1	Εισαγωγικά.....	10
2.2	Αναερόβια Χώνευση.....	10
2.2.1	Γενικά.....	10
2.2.2	Υποστρώματα για την αναερόβια χώνευση.....	10
2.2.3	Η βιοχημική διεργασία της αναερόβιας χώνευσης.....	12
2.2.4	Παράμετροι της αναερόβιας χώνευσης.....	14
2.2.5	Παράμετροι λειτουργίας.....	17
2.3	Παράγωγα της αναερόβιας χώνευσης.....	18
2.3.1	Βιοαέριο.....	18
2.3.2	Χωνευμένο υπόλειμμα (κομπόστ).....	20
2.4	Προοπτικές και αποδοτικότητα αξιοποίησης του βιοαερίου.....	20
3.	Μέθοδος Έρευνας.....	27
4.	Οικονομοτεχνική μελέτη.....	29
4.1	Γενική περιγραφή.....	29
4.2	Εκτίμηση παραγωγής.....	29
4.2.1	Παραγωγή βιοαερίου.....	29
4.2.2	Παραγωγή βιολογικού λιπάσματος.....	30
4.3	Οικονομική ανάλυση.....	30
4.3.1	Κόστος επένδυσης.....	30
4.3.2	Χρηματοδότηση επένδυσης.....	31
4.3.3	Υπολογισμός δανείου.....	31
4.3.4	Κόστος λειτουργίας.....	32
4.3.5	Αποσβέσεις.....	33
4.3.6	Ανάλυση εσόδων.....	35
4.3.7	Δείκτες απόδοσης επένδυσης.....	37
4.3.8	Παραδοχές.....	39
4.4	Ανάλυση ευαισθησίας.....	39
4.4.1	Ανάλυση ευαισθησίας για το κόστος επένδυσης.....	40
4.4.2	Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή αξιοποίησης των διαθέσιμων αποβλήτων στη μονάδα.....	43
4.4.3	Ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος.....	46
4.4.4	Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	49
4.4.5	Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια.....	52

4.4.6 Συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo	55
5. Συμπεράσματα.....	61
Κατάλογος Αναφορών.....	62
Κατάλογος Πινάκων.....	68
Κατάλογος Σχημάτων.....	69

Σύνοψη – Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διεξαγωγή μελέτης σκοπιμότητας της επένδυσης για την κατασκευή και τη λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, το οποίο προέρχεται από την αναερόβια χώνευση πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων.

Για την επίτευξη του βασικού αυτού στόχου της εργασίας αναπτύσσεται ένα μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης, ώστε να προκύψουν κάποιοι βασικοί οικονομικοί δείκτες βιωσιμότητας της επένδυσης. Γίνεται μελέτη της βιβλιογραφίας για την αναζήτηση των απαραίτητων δεδομένων και τρόπων υπολογισμού διαφόρων θεωρητικών μεγεθών, σχετικών με την παραγωγή του βιοαερίου και της δυνατότητας αξιοποίησής του για την παραγωγή ενέργειας και κατ' επέκταση οικονομικής ωφέλειας. Πραγματοποιήθηκαν μη δομημένες συνεντεύξεις με ειδικούς για την εύρεση των απαραίτητων για την εργασία μεγεθών που δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν από τη βιβλιογραφία αλλά είχαν άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Επίσης, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων μεταβλητών που παρουσιάζουν αστάθεια και μπορούν να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τους οικονομικούς δείκτες.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι υπάρχει περιθώριο κέρδους στην παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνεται η επίλυση του προβλήματος διαχείρισης των πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Επιπλέον, υπάρχει και κοινωνικό όφελος από την κατασκευή και λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο, λόγω της δημιουργίας θέσεων εργασίας. Η οικονομοτεχνική μελέτη που πραγματοποιείται, δείχνει ότι είναι σκόπιμη η επένδυση για την κατασκευή της εν λόγω μονάδας. Με 20% ίδια συμμετοχή στο κόστος της επένδυσης και με 25ετή διάρκεια, η επένδυση παρουσιάζει καθαρή παρούσα αξία (NPV) ίση με 37.127.414 €, εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR) 25,39 % και συντελεστή απόδοσης επένδυσης (ROI) 842 %, ενώ το αρχικό κεφάλαιο αποπληρώνεται σε 6 έτη από την έναρξη της επένδυσης. Καθοριστική συνεισφορά στα ετήσια έσοδα έχει κυρίως η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά σημαντικά είναι και τα έσοδα από την πώληση του βιολογικού λιπάσματος που είναι και αυτό παράγωγο της αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων. Η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητα της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των μεγεθών, για τις τιμές των οποίων δεν υπήρχε ακριβής γνώση.

Abstract

The object of the present thesis is the conduction of a feasibility study about the investment for the construction and operation of a biogas power plant. The biogas used at the power plant comes from the anaerobic digestion of poultry and livestock waste.

In order to achieve this basic goal of the thesis, a model of financial evaluation about the investment is developed, in order to estimate some basic economic indicators of the investment's viability. The literature is studied to search for the necessary data and ways of calculating various theoretical quantities related to the production of biogas and the possibility of its utilization for energy production and consequently economic benefit. Unstructured interviews were conducted with experts to find work-required quantities that could not be obtained from the literature but were directly relevant to the specific case study. Also, a sensitivity analysis is performed, when it comes to some variables that show instability and can significantly affect the economic indicators.

The literature review shows that there is a profit margin in energy production from biogas, while simultaneously the solution of the problem of poultry and livestock waste management is made easier. In addition, there is a social benefit from the construction and operation of a biogas power plant, due to the creation of jobs. The economic and technical study carried out shows that the investment for the construction of the unit in question is appropriate. With 20% equity participation in the investment cost and with a 25-year duration, the investment presents a net present value (NPV) equal to 37,127,414 €, an internal rate of return (IRR) of 25.39 % and a rate of return on investment (ROI) of 842 %, while the initial capital is repaid in 6 years from the beginning of the investment. Decisive contribution to the annual income mainly has the sale of electricity, but the income from the sale of biological fertilizer, which is also a derivative of the anaerobic digestion of waste, is also important. The sensitivity analysis confirms the viability of the investment, taking into account the variability of the quantities, the values of which were not precisely known.

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Γεγονός αποτελεί η ύπαρξη κτηνοτροφικής και πτηνοτροφικής δραστηριότητας στην Ελλάδα. Η δραστηριότητα αυτή έχει ως επακόλουθο την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων κτηνοτροφικών και πτηνοτροφικών αποβλήτων στις περιοχές όπου λαμβάνει χώρα αυτή η δραστηριότητα (Vlyssides, Mai and Baramprouti, 2015). Επιπλέον, είναι εμφανής η τάση για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η βιομάζα και πιο συγκεκριμένα το βιοαέριο, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Tsagarakis and Papadogiannis, 2006). Προκύπτει, λοιπόν, το ερώτημα, αν μπορούν οι προαναφερθείσες ποσότητες αποβλήτων να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη δημιουργία ωφέλειας σε περιβαλλοντικό, οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο (Al Seadi *et al.*, 2008).

1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της οικονομικής σκοπιμότητας για την κατασκευή και λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, το οποίο προέρχεται από πτηνοτροφικά και κτηνοτροφικά απόβλητα, σε μία περιοχή με μεγάλη πτηνοτροφική και κτηνοτροφική δραστηριότητα.

Επακόλουθη της διερεύνησης που αναφέρθηκε είναι η ανάδυση των παρακάτω ερωτημάτων:

- Υπάρχει περιθώριο οικονομικού οφέλους στο πεδίο της παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο;
- Με τη δεδομένη παραγωγή πρώτης ύλης στην περιοχή όπου πρόκειται να κατασκευαστεί η μονάδα, είναι σκόπιμη η επένδυση για την κατασκευή της;

Επιπλέον, για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας τίθενται οι παρακάτω επιμέρους στόχοι:

- Ανάπτυξη οικονομικού μοντέλου αξιολόγησης της επένδυσης
- Αναζήτηση έγκυρων αριθμητικών δεδομένων για τα στοιχεία του οικονομικού μοντέλου
- Ανάλυση ευαισθησίας σε ορισμένα μεγέθη που έχουν καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση της επένδυσης

1.3 Οριοθέτηση

Η εργασία περιορίζεται στην οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, χωρίς να εισέρχεται εις βάθος σε τεχνικές λεπτομέρειες. Επίσης, γίνεται ένα πλήθος παραδοχών και εκτιμήσεων σχετικά με διάφορα οικονομοτεχνικά μεγέθη.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγικά

Η εξάντληση των αποθεμάτων του πλανήτη σε μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ιδιαίτερα σε ορυκτά καύσιμα, αποτελεί ένα καίριας σημασίας πρόβλημα της σημερινής εποχής – τόσο για τις περιβαλλοντικές του προεκτάσεις όσο και για τα θέματα σχετικά με την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Ως εκ τούτου, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Adekunle and Okolie, 2015; Ileleji, Martin and Jones, 2015). Η βιομάζα - και ειδικότερα το βιοαέριο - αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που υπόσχεται σημαντική δυνατότητα αξιοποίησης στην κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης (Cavinato *et al.*, 2010; Kasinath *et al.*, 2021). Εδώ και αρκετά χρόνια έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην Ελλάδα (Tsagarakis and Papadogiannis, 2006). Το βιοαέριο είναι ένα μίγμα αερίων που παράγεται κατά κύριο λόγο από αστικά, βιομηχανικά και αγροτικά απόβλητα, κοπριά, αστικά και βιομηχανικά λύματα και προϊόντα ενεργειακών καλλιεργειών. Η διεργασία με την οποία παράγεται το βιοαέριο ονομάζεται αναερόβια χώνευση (Fardin, de Barros and Dias, 2018). Επιπλέον, η αναερόβια χώνευση εξυπηρετεί και την ανάγκη διαχείρισης των προαναφερθέντων αποβλήτων και λυμάτων, αξιοποιώντας μάλιστα, το ενεργειακό τους περιεχόμενο και επιλύοντας το πρόβλημα σχετικά με τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στο φυσικό περιβάλλον (Abouelenien *et al.*, 2014; Adekunle and Okolie, 2015; Kavalopoulos *et al.*, 2021; Kirim, Sadikoglu and Melikoglu, 2022).

2.2 Αναερόβια Χώνευση

2.2.1 Γενικά

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιοχημική διεργασία, κατά τη διάρκεια της οποίας, μεγάλα οργανικά μόρια αποσυντίθενται σε αναερόβιες συνθήκες, από διάφορους αναερόβιους μικροοργανισμούς, μέχρι τον σχηματισμό του βιοαερίου, δηλαδή ενός μίγματος από διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο (Chen, Cheng and Creamer, 2008). Το βιοαέριο είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αυξανόμενης σημασίας (Georgiou, Liliopoulos and Aivasidis, 2020). Σε μία εγκατάσταση βιοαερίου, το αποτέλεσμα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο και το χωνευμένο υπόλειμμα ή αλλιώς κομπόστ (Wahono, Maryana and Kismurtono, 2009). Ως διαδικασία, η αναερόβια χώνευση έχει σημαντικές προοπτικές στην κατεύθυνση της παραγωγής ενέργειας (Sofokleous *et al.*, 2022).

2.2.2 Υποστρώματα για την αναερόβια χώνευση

Για την παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφορα είδη βιομάζας ως πρώτη ύλη ή αλλιώς υπόστρωμα (Holm-Nielsen, Al Seadi and

Oleskowicz-Popiel, 2009). Κάποιες συνήθεις κατηγορίες πρώτης ύλης που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση είναι οι παρακάτω:

- Ζωικά περιττώματα
- Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα
- Οργανικά απόβλητα που μπορούν να υποστούν χώνευση από τρόφιμα και αγροτοβιομηχανίες (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Το οργανικό μέρος των αστικών αποβλήτων και από τις επιχειρήσεις εστίασης (φυτικής και ζωικής προέλευσης)
- Λυματολάσπη
- Ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. αραβόσιτος, μίσχανθος, σόργο, τριφύλλι)

(Wahono, Maryana and Kismurtono, 2009)

Η χρήση των ζωικών περιττωμάτων ως πρώτη ύλη για την αναερόβια χώνευση έχει μερικά πλεονεκτήματα λόγω των ιδιοτήτων τους:

- Του φυσικού περιεχομένου τους σε αναερόβια βακτηρίδια.
- Του υψηλού περιεχομένου τους σε νερό (4-8% ξηρής ουσίας στους πολτούς), το οποίο ενεργεί ως διαλύτης για τα άλλα ομο-υποστρώματα και εξασφαλίζει την κατάλληλη ανάμιξη και ροή της βιομάζας.
- Της οικονομικής τιμής.
- Της υψηλής προσβασιμότητας, καθώς συλλέγονται ως υπόλειμμα από τη ζωική καλλιέργεια.

(Al Seadi *et al.*, 2008)

Μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση των υποστρωμάτων σύμφωνα με διάφορους παράγοντες, όπως η προέλευση, η περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία, η παραγωγή μεθανίου κλπ. Ο Πίνακας 1 δίνει μία επισκόπηση επιλεγμένων χαρακτηριστικών για κάποια ήδη υποστρωμάτων, κατάλληλων για αναερόβια χώνευση.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μερικών υποστρωμάτων κατάλληλων για αναερόβια χώνευση

Τύπος πρώτης ύλης	Οργανικό περιεχόμενο	Ξηρή Ουσία (TS) %	VS % της ΞΟ	Παραγωγή βιοαερίου $m^3 \cdot kg^{-1} VS$
Κοπριά χοίρων	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	12,5	75	0,25-0,50
Κοπριά βοοειδών	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	12	80	0,20-0,30

Τύπος πρώτης ύλης	Οργανικό περιεχόμενο	Ξηρή Ουσία (TS) %	VS % της ΞΟ	Παραγωγή βιοαερίου $m^3 \cdot kg^{-1} VS$
Κοπριά πουλερικών	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	25	80	0,35-0,60
Περιεχόμενα στομαχιών, εντέρων	Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια	15	80	0,40-0,68
Τυρόγαλο	75-80% λακτόζη 20-25% πρωτεΐνες	8-12	90	0,35-0,80
Συμπυκνωμένος ορός γάλακτος	75-80% λακτόζη 20-25% πρωτεΐνες	20-25	90	0,80-0,95
Αποπλύματα της ζύμωσης	Υδατάνθρακες	1-5	80-95	0,35-0,78
Άχυρο	Υδατάνθρακες, λιπίδια	70-90	80-90	0,15-0,35
Απόβλητα κήπων		60-70	90	0,20-0,50
Χλόη		20-25	90	0,55
Σωρός χλόης		15-25	90	0,56
Απόβλητα φρούτων		15-20	75	0,25-0,50
Υπολείμματα τροφίμων		10	80	0,50-0,60

Πηγή: (Al Seadi *et al.*, 2008; Kasinath *et al.*, 2021)

2.2.3 Η βιοχημική διεργασία της αναερόβιας χώνευσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αναερόβια χώνευση είναι μία μικροβιολογική διαδικασία, κατά την οποία, σύνθετη οργανική ύλη διασπάται, απουσία οξυγόνου, προς παραγωγή βιοαερίου. Δευτερεύον προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι και το χωνευμένο υπόλειμμα (κομποστ). Το βιοαέριο είναι ένα αέριο καύσιμο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το χωνευμένο υπόλειμμα (κομποστ) είναι το αποσυντεθειμένο

υπόστρωμα, επακόλουθο της παραγωγής του βιοαερίου (Wahono, Maryana and Kismurtono, 2009).

Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, παράγεται πολύ λίγη θερμότητα σε αντίθεση με την αερόβια (παρουσία οξυγόνου) αποσύνθεση, όπως η κομποστοποίηση. Η ενέργεια, που είναι χημικά δεσμευμένη μέσα στο υπόστρωμα, παραμένει κυρίως στο παραγόμενο βιοαέριο με τη μορφή μεθανίου (Al Seadi *et al.*, 2008).

Η βιοχημική διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, μέσω της οποίας γίνεται ο σχηματισμός του βιοαερίου, είναι ένα αποτέλεσμα συνδυαστικών βημάτων, στα οποία το αρχικό υλικό συνεχώς διασπάται σε μικρότερα στοιχεία. Ειδικές ομάδες μικροοργανισμών εμπλέκονται σε καθένα από τα μεμονωμένα βήματα. Αυτοί οι οργανισμοί αποσυνθέτουν διαδοχικά τα προϊόντα των προηγούμενων βημάτων. Τα τέσσερα κύρια βήματα της διεργασίας είναι η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση και η μεθανογένεση (Vyas *et al.*, 2022). Τα διαφορετικά στάδια της διεργασίας λαμβάνουν χώρα παράλληλα στο χώρο και το χρόνο, μέσα στον χωνευτήρα. Η ταχύτητα της συνολικής διεργασίας αποσύνθεσης καθορίζεται από την πιο αργή αντίδραση της αλυσίδας. Στην περίπτωση των εγκαταστάσεων βιοαερίου όπου γίνεται επεξεργασία των φυτικών υποστρωμάτων που περιέχουν κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη ή λιγνίνη, η υδρόλυση είναι αυτή που καθορίζει την ταχύτητα της διεργασίας. Κατά την υδρόλυση, παράγονται σχετικά μικρές ποσότητες βιοαερίου. Η παραγωγή βιοαερίου φθάνει στην αιχμή της κατά την μεθανογένεση (Al Seadi *et al.*, 2008). Το κάθε βήμα περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.2.3.1 Υδρόλυση

Η υδρόλυση είναι το πρώτο στάδιο της βιοχημικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης. Κατά τη διάρκεια της υδρόλυσης, η σύνθετη οργανική ύλη (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια) διασπάται σε μικρότερα μόρια (σάκχαρα, αμινοξέα, λιπαρά οξέα), με τη βοήθεια υδρολυτικών ενζύμων που έχουν ήδη εκκριθεί από υδρολυτικά βακτήρια του υποστρώματος (Wijffels, Barten and Reith, 2003). Αναλυτικότερα, λαμβάνοντας υπόψη το δεδομένο ότι τα βακτήρια δεν μπορούν να προσλάβουν οργανική ύλη, το πρώτο βήμα της αναερόβιας αποικοδόμησης συνίσταται στην υδρόλυση πολυμερών. Αυτή η διαδικασία αποτελεί ένα φαινόμενο στο οποίο τα πολυμερή σωματίδια αποικοδομούνται μέσω της δράσης εξωκυτταρικών ενζύμων για να παράγουν μικρότερα μόρια, κατάλληλα για να ληφθούν από τα οξεογενή βακτήρια (Adekunle and Okolie, 2015). Κατά τη διαδικασία της υδρόλυσης, οι πρωτεΐνες υδρολύονται σε αμινοξέα, οι πολυσακχαρίτες σε απλά σάκχαρα και τα λιπίδια σε λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας (LCFA). Η υδρόλυση γίνεται στις περισσότερες περιπτώσεις, κυρίως με ημιστερεά υποστρώματα και λύματα με υψηλή αναλογία αιωρούμενων στερεών, το στάδιο που καθορίζει τη συνολική διάρκεια της διεργασίας, δρα δηλαδή περιοριστικά ως προς τον ρυθμό εκτέλεσης της αναερόβιας χώνευσης. Επιπλέον, η διαδικασία της υδρόλυσης είναι πολύ ευαίσθητη στις θερμοκρασίες και στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός αναερόβιων χωνευτών για ημι-στερεά υποστρώματα και λύματα με υψηλή αναλογία αιωρούμενων στερεών, όπως υποδοχές αποστακτηρίων και λύματα χαμηλής θερμοκρασίας, βασίζεται συνήθως στο στάδιο της υδρόλυσης (Fukuhara, 2012).

2.2.3.2 Οξεογένεση

Τα μονομερή που παράγονται στο στάδιο της υδρόλυσης προσλαμβάνονται από αναερόβια βακτήρια και αποικοδομούνται περαιτέρω σε οργανικά οξέα βραχείας αλυσίδας όπως βουτυρικά οξέα, προπανικά οξέα, οξικά οξέα, αλκοόλες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Η συγκέντρωση του υδρογόνου που σχηματίζεται ως ενδιάμεσο προϊόν σε αυτό το στάδιο της διεργασίας, επηρεάζει τον τύπο του τελικού προϊόντος που παράγεται κατά τη διαδικασία της ζύμωσης. Γενικά, κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, τα απλά σάκχαρα, τα λιπαρά οξέα και τα αμινοξέα μετατρέπονται σε οργανικά οξέα και αλκοόλες (Adekunle and Okolie, 2015). Η οξεογένεση είναι μια πολύ κοινή αντίδραση και πραγματοποιείται από μια μεγάλη ομάδα υδρολυτικών και μη υδρολυτικών μικροοργανισμών. Η οξεογένεση είναι το πιο γρήγορο στάδιο της αλυσίδας αντιδράσεων που συνιστούν την αναερόβια χώνευση (Fukuhara, 2012).

2.2.3.3 Οξικογένεση

Σε αυτό το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης γίνεται μια περαιτέρω αποδόμηση ενώσεων που παράχθηκαν στα προηγούμενα στάδια (Fukuhara, 2012). Η οξικογένεση θεωρείται ως η αναερόβια οξείδωση λιπαρών οξέων μακράς αλυσίδας (LCFA) και βραχείας αλυσίδας (VFA) (Delgenes, Renaud and Moletta, 2003). Τα προϊόντα που παράγονται στη φάση της οξεογένεσης καταναλώνονται ως υποστρώματα για τους μικροοργανισμούς που δραστηριοποιούνται στην τρίτη φάση, δηλαδή στο στάδιο της οξικογένεσης (Aslanzadeh, 2014). Προϊόντα που δεν μπορούν να μετατραπούν απευθείας σε μεθάνιο από μεθανογόνα βακτήρια μετατρέπονται σε μεθανογόνα υποστρώματα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογόνα υποστρώματα όπως οξικό ιόν, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδες άνθρακα μεγαλύτερες από μία μονάδα οξειδώνονται σε οξικό ιόν και υδρογόνο (Al Seadi *et al.*, 2008).

2.2.3.4 Μεθανογένεση

Με το στάδιο της μεθανογένεσης ολοκληρώνεται η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Η παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από μεθανογόνα βακτήρια, υπό αυστηρές αναερόβιες συνθήκες (Aslanzadeh, 2014; Manesh, Rezazadeh and Kabiri, 2020). Κυρίως, το μεθάνιο παράγεται από το οξικό οξύ, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Οι μεθανιογόνοι μικροοργανισμοί διακρίνονται σε αυτούς που μετατρέπουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο, αυτούς που μετατρέπουν το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα σε μεθάνιο και αυτούς που μετατρέπουν τη μεθανόλη και τις μεθυλαμίνες σε μεθάνιο (Angelidaki *et al.*, 2002). Η μεθανογένεση είναι ένα κρίσιμο βήμα στη συνολική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, καθώς είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διαδικασίας (Adekunle and Okolie, 2015).

2.2.4 Παράμετροι της αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση είναι μία σύνθετη διαδικασία. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από ποικίλες φυσικές, χημικές και βιολογικές παραμέτρους. Λόγω του ότι η συνολική διαδικασία συνίσταται σε διαφορετικά στάδια όπως περιγράφηκε

παραπάνω και λόγω της συνύπαρξης διαφορετικών μικροοργανισμών, οποιαδήποτε μεταβολή κάποιας από τις παραμέτρους επηρεάζει σημαντικά το σύνολο της διαδικασίας (Aslanzadeh, 2014). Μεγάλη σημασία έχει να παρέχονται οι κατάλληλες συνθήκες για τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη και τη δραστηριότητα των μικροοργανισμών αυτών, έχει ο αποκλεισμός του οξυγόνου, η θερμοκρασία, η τιμή του pH, ο ανεφοδιασμός με θρεπτικές ουσίες, η ένταση της ανάδευσης, καθώς και η παρουσία και η ποσότητα παραγόντων που δρουν ανασταλτικά (Al Seadi *et al.*, 2008). Στη συνέχεια, περιγράφεται συνοπτικά η επίδραση των κυριότερων παραμέτρων της αναερόβιας χώνευσης.

2.2.4.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης λόγω της επίδρασης της τιμής της, καθώς και των μεταβολών της στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών (Angelidaki, Ellegaard and Kiser, 2003; Chen, Cheng and Creamer, 2008). Η επιλογή της θερμοκρασίας λειτουργίας για την αναερόβια χώνευση εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος και τον τύπο του χωνευτήρα. Ανεξάρτητα, όμως, από την επιλογή της θερμοκρασίας, μεγάλη σημασία έχει η σταθερότητα της τιμής της κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης (Jain *et al.*, 2015). Γίνεται διάκριση της αναερόβιας χώνευσης σε τρία θερμοκρασιακά εύρη (Angelidaki, Ellegaard and Kiser, 2003; Delgenes, Penaud and Moletta, 2003; Al Seadi *et al.*, 2008; Aslanzadeh, 2014; Adekunle and Okolie, 2015; Mao *et al.*, 2015):

- ψυχρόφιλη (10-25 °C)
- μεσόφιλη (25- 45°C)
- θερμόφιλη (45-70°C)

Κατά κύριο λόγο, η διεξαγωγή της αναερόβιας χώνευσης γίνεται στο μεσοφιλικό και το θερμοφιλικό εύρος. Η εμπειρία έχει δείξει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εντός κάποιων ορίων, κατά κανόνα ευνοεί την αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης (Angelidaki, Ellegaard and Kiser, 2003). Ωστόσο, η διεξαγωγή της αναερόβιας χώνευσης στη θερμόφιλη περιοχή παρουσιάζει μειωμένη ευστάθεια (Angelidaki and Ahring, 1994).

2.2.4.2 Τιμή pH

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του pH. Το διάστημα τιμών του pH στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί η αναερόβια χώνευση είναι πολύ περιορισμένο (Angelidaki, Ellegaard and Kiser, 2003). Το pH του υποστρώματος της αναερόβιας χώνευσης επηρεάζει σημαντικά την αύξηση του αριθμού των μεθανογενών και των οξεογενών μικροοργανισμών (Mao *et al.*, 2015; Zamri *et al.*, 2021). Επίσης, μπορεί να έχει επιπτώσεις στο διαχωρισμό μερικών ενώσεων που έχουν σημασία για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (Al Seadi *et al.*, 2008). Το καθένα από τα στάδια της βιοχημικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης ευνοείται σε συγκεκριμένο εύρος τιμών pH, το οποίο

είναι διαφορετικό σε κάθε στάδιο λόγω της διαφοροποίησης των μικροοργανισμών που επιτελούν κάθε στάδιο της διεργασίας. Το βέλτιστο εύρος τιμών pH για το σύνολο της διεργασίας είναι 6,8-7,4 (Mao *et al.*, 2015).

2.2.4.3 Πτητικά λιπαρά οξέα

Τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) είναι οι ενδιάμεσες ενώσεις που παράγονται κατά την αναερόβια μετατροπή οργανικών υλικών (Ahn *et al.*, 2010). Αποτελούν σημαντικό δείκτη για την αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης επειδή σχετίζονται στενά με τις αλλαγές στο pH, την αλκαλικότητα και τη δραστηριότητα των μεθανογόνων μικροοργανισμών. Το οξικό οξύ, το προπιονικό οξύ και το βουτυρικό οξύ είναι τα κύρια πτητικά λιπαρά οξέα που παράγονται κατά τις διαδικασίες αναερόβιας χώνευσης (Abouelenien *et al.*, 2014). Η συγκέντρωσή τους συνιστά κρίσιμο παράγοντα για την ευστάθεια της χημικής διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (Bolzonella *et al.*, 2003). Υψηλή συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων μέσα στον χωνευτήρα μπορεί έχει ως επακόλουθο τη μείωση της τιμής του pH και κατά συνέπεια επιδρά καταλυτικά στους διάφορους μικροοργανισμούς (Al Seadi *et al.*, 2008).

2.2.4.4 Αμμωνία

Τα ζωικά απόβλητα περιέχουν ενώσεις που απελευθερώνουν αμμωνία όταν αποικοδομούνται, όπως για παράδειγμα ουρία και πρωτεΐνες (Angelidaki and Ahring, 1993; Yenigün and Demirel, 2013). Η αμμωνία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας σε πλήθος βιοχημικών διαδικασιών και ιδιαίτερα στην αναερόβια χώνευση, επειδή είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών που επιτελούν τη διαδικασία αυτή (Yenigün and Demirel, 2013; Abouelenien *et al.*, 2014). Ωστόσο, η υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας – ειδικά στη μη ιονισμένη μορφή της – δρα ανασταλτικά κατά την αναερόβια χώνευση (Tian *et al.*, 2019). Ιδιαίτερα τα μεθανογενή βακτηρίδια επηρεάζονται αρνητικά από την υψηλή ύπαρξη αμμωνίας, καθιστώντας έτσι το στάδιο της μεθανογένεσης ως το πιο ευαίσθητο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης (Chen, Cheng and Creamer, 2008). Μία ενδεικτική τιμή κάτω από την οποία πρέπει να διατηρείται η συγκέντρωση της αμμωνίας είναι τα 80 mg/l (Al Seadi *et al.*, 2008).

2.2.4.5 Ιχνοστοιχεία, θρεπτικές ουσίες και τοξικές ενώσεις

Η ύπαρξη ιχνοστοιχείων όπως θείο, κάλιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, χλωριούχα και θειικά ιόντα, ίχνη σιδήρου, χαλκού, ψευδαργύρου, μαγγανίου, μολυβδαινίου και βαναδίου είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό των μικροοργανισμών και κατά συνέπεια για τη συνολική διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Murphy and Thanasis Thamsiriroj, 2013). Οι μικροοργανισμοί χρειάζονται τα ιχνοστοιχεία ως δομικά στοιχεία για ανάπτυξη, καθώς και για την υποστήριξη ενζυμικών δραστηριοτήτων και χημικών αντιδράσεων κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Mao *et al.*, 2015). Η αναλογία ιχνοστοιχείων που θεωρείται επαρκής είναι C:N:P:S=600:15:5:1 (Weiland, 2010) ενώ η βέλτιστη αναλογία C:N:P για την αύξηση της απόδοσης μεθανίου αναφέρεται ότι είναι 200:5:1 (Feng *et al.*, 2010). Ωστόσο, υπάρχουν και ενώσεις που δρουν ανασταλτικά στη δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών. Αυτές είναι οι τοξικές ενώσεις που πιθανόν μεταφέρονται στο σύστημα μαζί

με την πρώτη ύλη ή παράγονται κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων της αναερόβιας χώνευσης (Al Seadi *et al.*, 2008).

2.2.5 Παράμετροι λειτουργίας

Ο όγκος του αντιδραστήρα πρέπει να προσαρμοστεί στην ποσότητα της α΄ ύλης και στον ρυθμό βιοαποδόμησης του υποστρώματος. Οι μικροοργανισμοί πρέπει να έχουν επαρκή χρόνο για τη διαδικασία αποδόμησης, ενώ συγχρόνως, η συγκέντρωση της οργανικής ύλης δεν πρέπει να είναι τέτοια που να οδηγεί σε υπερβολική τροφοδοσία των μικροβίων και συνεπώς παρεμπόδιση της διαδικασίας. Για την εξασφάλιση της ισορροπίας των παραπάνω συνθηκών, χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι για τον υπολογισμό του όγκου του αντιδραστήρα. Αυτές είναι το οργανικό φορτίο (Organic Loading Rate) και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time) (Bachmann, 2013). Για την κατασκευή μιας εγκατάστασης βιοαερίου, ένας συδυασμός τεχνοοικονομικών εκτιμήσεων απαιτείται. Για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής του βιοαερίου που θα μπορούσε δυνητικά να πραγματοποιηθεί από την πλήρη αναερόβια χώνευση του υποστρώματος, ένας πολύ μεγάλος υδραυλικός χρόνος παραμονής και ένα πολύ μεγάλο μέγεθος αντιδραστήρα θα απαιτούνταν. Πρακτικά, ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του συστήματος γίνεται συμβιβάζοντας τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου και τη δικαιολογήσιμη οικονομία (Al Seadi *et al.*, 2008).

2.2.5.1 Οργανικό φορτίο

Το οργανικό φορτίο (Organic Loading Rate – OLR) αποτελεί την ποσότητα των πτητικών στερεών (VS) που τροφοδοτούνται ημερησίως σε έναν χωνευτήρα υπό συνεχή τροφοδοσία (Mao *et al.*, 2015). Είναι ένας επιπρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (TG, Haq and Kalamdhad, 2022; Vyas *et al.*, 2022). Κατά κανόνα, δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλό για τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου (Park *et al.*, 2019). Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις που υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να ευνοηθεί η παραγωγή βιοαερίου κατά την αναερόβια χώνευση με υψηλό οργανικό φορτίο (Bi *et al.*, 2019).

Το οργανικό φορτίο (OLR) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Al Seadi *et al.*, 2008; Bachmann, 2013):

$$OLR = \frac{\dot{m} * DM * VS}{V_R}$$

OLR οργανικό φορτίο $\left(\frac{\text{kg}}{\text{day} * \text{m}^3}\right)$

\dot{m} παροχή μάζας τροφοδοτούμενου υποστρώματος ανά μονάδα χρόνου $\left(\frac{\text{kg}}{\text{day}}\right)$

DM συγκέντρωση ξηρής ουσίας στο υπόστρωμα (%)

VS συγκέντρωση οργανικής ουσίας ή αλλιώς πτητικών στερεών (% του DM)

V_R όγκος του χωνευτήρα (m³)

2.2.5.2 Υδραυλικός χρόνος παραμονής

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time – HRT) περιγράφει τη θεωρητική χρονική περίοδο που τα υποστρώματα παραμένουν στον χωνευτήρα (Bachmann, 2013). Υπολογίζεται σε χρονικό ορίζοντα τάξης μεγέθους μερικών ημερών. Μικρές τιμές του υδραυλικού χρόνου παραμονής δίνουν πλεονέκτημα από οικονομική άποψη, καθώς μειώνεται η επένδυση κεφαλαίου ενώ μεγάλες τιμές του συνεπάγονται αυξημένη παραγωγή βιοαερίου (Yang *et al.*, 2020; Kalaiselvan *et al.*, 2022). Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται επαρκώς η αποικοδόμηση του υποστρώματος χωρίς να πρέπει να αυξηθεί υπερβολικά ο όγκος του χωνευτήρα (Bachmann, 2013).

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (Al Seadi *et al.*, 2008; Bachmann, 2013):

$$\text{HRT} = \frac{V_R}{\dot{V}}$$

HRT υδραυλικός χρόνος παραμονής (days)

V_R καθαρός όγκος του χωνευτήρα (m³)

\dot{V} παροχή όγκου του υποστρώματος που τροφοδοτείται στον χωνευτήρα $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{day}}\right)$

2.3 Παράγωγα της αναερόβιας χώνευσης

2.3.1 Βιοαέριο

2.3.1.1 Γενικά

Το βιοαέριο αποτελεί μια πολύ σημαντική εναλλακτική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον (Lu and Gao, 2021; Kalaiselvan *et al.*, 2022). Ακόμα και συγκριτικά με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα η ευκολία αποθήκευσης και διανομής μέσω ήδη υπαρχόντων υποδομών δικτύων διανομής φυσικού αερίου, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών (Holm-Nielsen, Al Seadi and Oleskowicz-Popiel, 2009). Σε μία μονάδα παραγωγής βιοαερίου, το βιοαέριο παράγεται μέσω της βιοαποδόμησης της βιομάζας σε αναερόβιες συνθήκες με τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης (Da Costa Gomez, 2013).

2.3.1.2 Σύνθεση του βιοαερίου

Το βιοαέριο αποτελείται κατά κύριο λόγο από μεθάνιο (CH₄) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), ενώ μπορεί να περιέχει μικρές ποσότητες από υδρόθειο (H₂S), υγρασία και σιλοξάνια (Wahono, Maryana and Kismurtono, 2009). Ωστόσο, η συνολική σύνθεσή του μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την α' ύλη που χρησιμοποιήθηκε ως υπόστρωμα, την εγκατάσταση και τις συνθήκες παραγωγής του (Al Seadi *et al.*, 2008; Muth *et al.*, 2021). Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει κάποιες από τις μέσες τιμές σύνθεσης του βιοαερίου.

Πίνακας 2: Σύνθεση του βιοαερίου

Συστατικό	Χημικός τύπος	Περιεκτικότητα (Vol.-%)
Μεθάνιο	CH ₄	50-75
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	25-45
Υδρατμοί	H ₂ O	2 (20°C) -7 (40°C)
Οξυγόνο	O ₂	<2
Άζωτο	N ₂	<2
Αμμωνία	NH ₃	<1
Υδρογόνο	H ₂	<1
Υδρόθειο	H ₂ S	<1

Πηγή: (Al Seadi *et al.*, 2008)

2.3.1.3 Ιδιότητες του βιοαερίου

Το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση είναι δεσμευμένο στο μεθάνιο. Θεωρώντας ότι το βιοαέριο έχει 50% περιεχόμενο σε μεθάνιο, η μέση θερμαντική τιμή του είναι περίπου 21 MJ/Nm³, η μέση πυκνότητα 1,22 kg/Nm³ και η μάζα του είναι παρόμοια με αυτή του αέρα (1,29 kg/Nm³) (Al Seadi *et al.*, 2008). Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει κάποιες ενδεικτικές τιμές για το ποσοστό μεθανίου του παραγόμενου βιοαερίου και την ποσότητα βιοαερίου που παράγεται, ανάλογα με το είδος του υποστρώματος, για επιλεγμένους τύπους α' ύλης.

Πίνακας 3: Παραγωγή μεθανίου και βιοαερίου για διάφορους τύπους α' ύλης

Πρώτη ύλη	Παραγωγή μεθανίου (%)	Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /t φρέσκιας α' ύλης)
Κοπριά βοοειδών	60	45
Κοπριά χοίρων	60	60
Κοπριά πουλερικών	60	80
Τεύτλα	53	88
Οργανικά απόβλητα	61	100
Γλυκό σόργο	54	108
Ενσίρωμα χλόης	54	172
Ενσίρωμα καλαμποκιού	52	202

Πηγή: (Al Seadi *et al.*, 2008)

Το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου είναι 6 kWh/m³ (Khalil *et al.*, 2019).

2.3.2 Χωνευμένο υπόλειμμα (κομπόστ)

Εκτός από το βιοαέριο, προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι το χωνευμένο υπόλειμμα (κομπόστ). Το χωνευμένο υπόλειμμα, έχει πλούσια σύσταση σε χημικά στοιχεία όπως το άζωτο, ο φώσφορος, το κάλιο, καθώς και σε ωφέλιμη μικροβιακή χλωρίδα (Al Seadi *et al.*, 2008). Ως εκ τούτου, μπορεί να αξιοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό (Bi *et al.*, 2019). Λόγω της υψηλής ομοιγένειας και συγκέντρωσης θρεπτικών συστατικών, της καλύτερης αναλογίας C/N, του φιλικότερου προς τα φυτά pH, το χωνευμένο υπόλειμμα καθίσταται λίπασμα μεγαλύτερης αποδοτικότητας συγκριτικά με την κοινή κοπριά (Al Seadi *et al.*, 2008). Μάλιστα, λόγω των βελτιωμένων ροϊκών ιδιοτήτων, το χωνευμένο υπόλειμμα μπορεί να διεισδύσει γρηγορότερα στο έδαφος, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο για απώλειες αζώτου από τις εκπομπές αμμωνίας. Επίσης, η αναερόβια χώνευση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των οσμών σε μεγάλο ποσοστό (Weiland, 2010; Riva *et al.*, 2016).

2.4 Προοπτικές και αποδοτικότητα αξιοποίησης του βιοαερίου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Tsagarakis and Papadogiannis, 2006). Σε πολλές χώρες σε παγκόσμια κλίμακα έχει διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης της διαθέσιμη βιομάζας για την παραγωγή βιοαερίου άρα και ενέργειας και κατεπέκταση για την παραγωγή κέρδους (Ghaem Sigarchian *et al.*, 2015; Khoshgoftar Manesh, Rezazadeh and Kabiri, 2020). Επιπλέον, έχουν γίνει προσπάθειες για δημιουργία μοντέλων διερεύνησης της οικονομικής σκοπιμότητας γύρω από την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο (Xu, Liu and Dai, 2021).

Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα από διάφορες μελέτες και εργασίες σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο που έχουν πραγματοποιηθεί.

Μελέτη σκοπιμότητας για την παραγωγή βιοαερίου σε μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων στην Γκάνα (Mohammed *et al.*, 2017)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 4.723.276 €
- Ετήσια παραγωγή βιοαερίου: 118.912 m³
- NPV: 1.926.192 €
- IRR: 29 %
- Payback period: 7 έτη

Μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας μιας μονάδας βιοαερίου μικρής κλίμακας με χρήση διεργασίας δύο σταδίων και σταθερού αντιδραστήρα βιοφίλμ για μια οικονομικά αποδοτική παραγωγή (Renda *et al.*, 2016)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 2.033.200 €
- Ετήσια παραγωγή βιοαερίου: 1.200.000 m³
- NPV: 1.726.789 €
- Payback period: 7 έτη

Πρόγνωση της δυνατότητας και της οικονομικής σκοπιμότητας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βιοαερίου από απόβλητα τροφίμων στην Γκάνα: Στοιχεία από την Άκρα και το Κουμάσι (Cudjoe *et al.*, 2021)

Στοιχεία από την Άκρα:

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 66.003.901 €
- Ετήσια παραγωγή βιοαερίου: 136.122.632 m³
- NPV: 217.800.000 €
- IRR: 20 %
- Payback period: 7,9 έτη

Στοιχεία από το Κουμάσι:

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 45.520.642 €
- Ετήσια παραγωγή βιοαερίου: 131.732.105 m³
- NPV: 156.100.000 €

- IRR: 19,6 %
- Payback period: 8,1 έτη

Μετατροπή αντιμικροβιακού υποστρώματος φύλλων του φυτού neem σε συν-υπόστρωμα που παράγει μεθάνιο για την παραγωγή καθαρής και οικονομικά προσιτής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω βιοαερίου: μία μελέτη περίπτωσης (Muhammad and Chandra, 2022)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 1.899.569 €
- NPV: 8.947.823 €
- IRR: 47,77 %
- Payback period: 2,07 έτη

Τεχνοοικονομική αξιολόγηση της ξηρής ζύμωσης σε οικιακές μονάδες βιοαερίου μέσω συγχώνευσης κοπριάς και υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών στην Αίγυπτο (Samer *et al.*, 2020)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 1.151 €
- NPV: 32.092 €
- IRR: 37,90 %
- Payback period: 3,2 έτη

Τεχνο-οικονομική μελέτη για μονάδα παραγωγής βιοαερίου σε αγελαδοτροφική μονάδα (Παπαζηλάκης, 2013)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 2.512.386 €
- NPV: 4.117.985 €
- IRR: 45,70%

Διερεύνηση δυνατοτήτων παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου (Λιαντινώτη, 2011)

- Κόστος αρχικής επένδυσης: 1.400.000 €
- Ετήσια παραγωγή βιοαερίου: 1.210.000 m³
- NPV: 342.793 € €
- IRR: 16,87 %

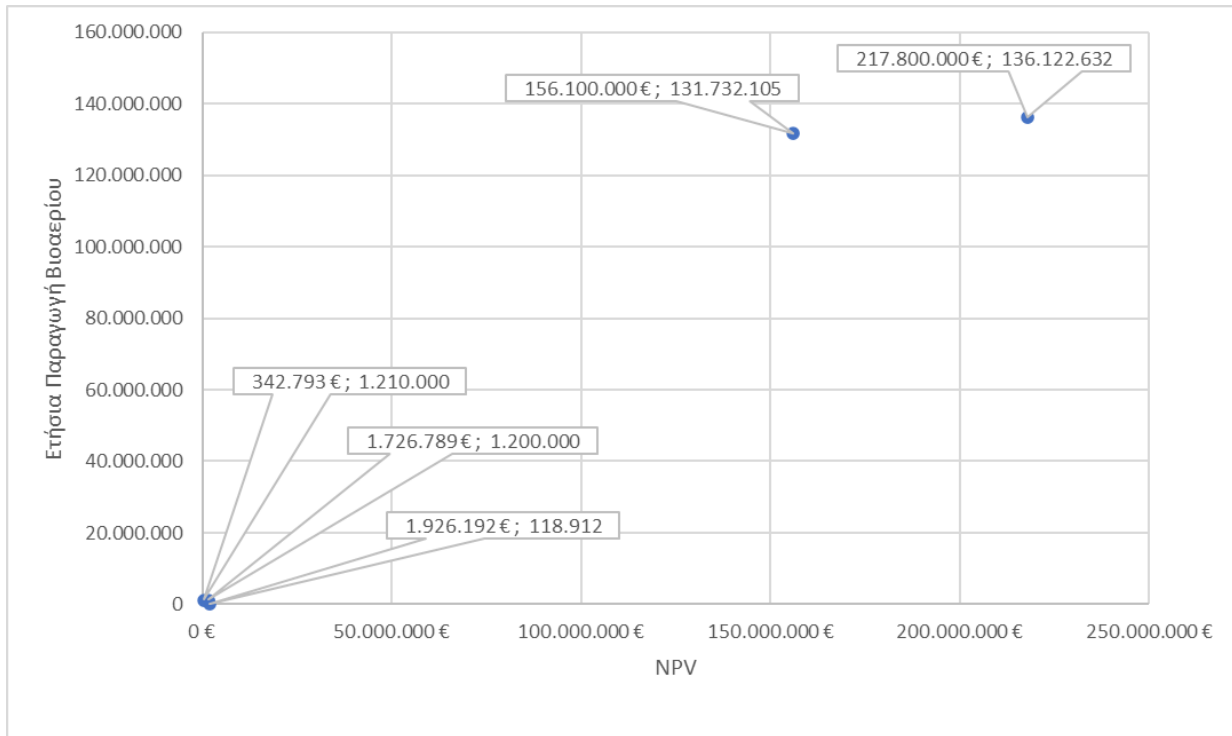
Τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Μελέτες και εργασίες διερεύνησης της οικονομικής σκοπιμότητας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο

Τίτλος μελέτης ή εργασίας	Αρχική επένδυση	Ετήσια παραγωγή βιοαερίου (m ³)	NPV	IRR	Payback Period (έτη)	Αναφορά
Μελέτη σκοπιμότητας για την παραγωγή βιοαερίου σε μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων στην Γκάνα	4.723.276 €	118.912	1.926.192 €	29,00%	7,00	(Mohammed et al., 2017)
Μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας μιας μονάδας βιοαερίου μικρής κλίμακας με χρήση διεργασίας δύο σταδίων και σταθερού αντιδραστήρα βιοφίλμ για μια οικονομικά αποδοτική παραγωγή	2.033.200 €	1.200.000	1.726.789 €		7,00	(Renda et al., 2016)
Πρόγνωση της δυνατότητας και της οικονομικής σκοπιμότητας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βιοαερίου από απόβλητα τροφίμων στην Γκάνα: Στοιχεία από την Άκρα και το Κουμάσι	66.003.901 €	136.122.632	217.800.000 €	20,00%	7,90	(Cudjoe et al., 2021)
Πρόγνωση της δυνατότητας και της οικονομικής σκοπιμότητας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση βιοαερίου από απόβλητα τροφίμων στην Γκάνα: Στοιχεία από την Άκρα και το Κουμάσι	45.520.642 €	131.732.105	156.100.000 €	19,60%	8,10	(Cudjoe et al., 2021)
Μετατροπή αντιμικροβιακού υποστρώματος φύλλων του φυτού neem σε συν-	1.899.569 €		8.947.823 €	47,77%	2,07	(Muhammad and Chandra, 2022)

Τίτλος μελέτης ή εργασίας	Αρχική επένδυση	Ετήσια παραγωγή βιοαερίου (m ³)	NPV	IRR	Payback Period (έτη)	Αναφορά
υπόστρωμα που παράγει μεθάνιο για την παραγωγή καθαρής και οικονομικά προσιτής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω βιοαερίου: μία μελέτη περίπτωσης						
Τεχνοοικονομική αξιολόγηση της ξηρής ζύμωσης σε οικιακές μονάδες βιοαερίου μέσω συγχώνευσης κοπριάς και υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών στην Αίγυπτο	1.151 €		32.092 €	37,90%	3,20	(Samer et al., 2020)
Τεχνο-οικονομική μελέτη για μονάδα παραγωγής βιοαερίου σε αγελαδοτροφική μονάδα	2.512.386 €		4.117.985 €	45,70%		(Παπαζηλάκης, 2013)
Διερεύνηση δυνατοτήτων παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου	1.400.000 €	1.210.000	342.793 €	16,87%		(Λιαντινιώτη, 2011)

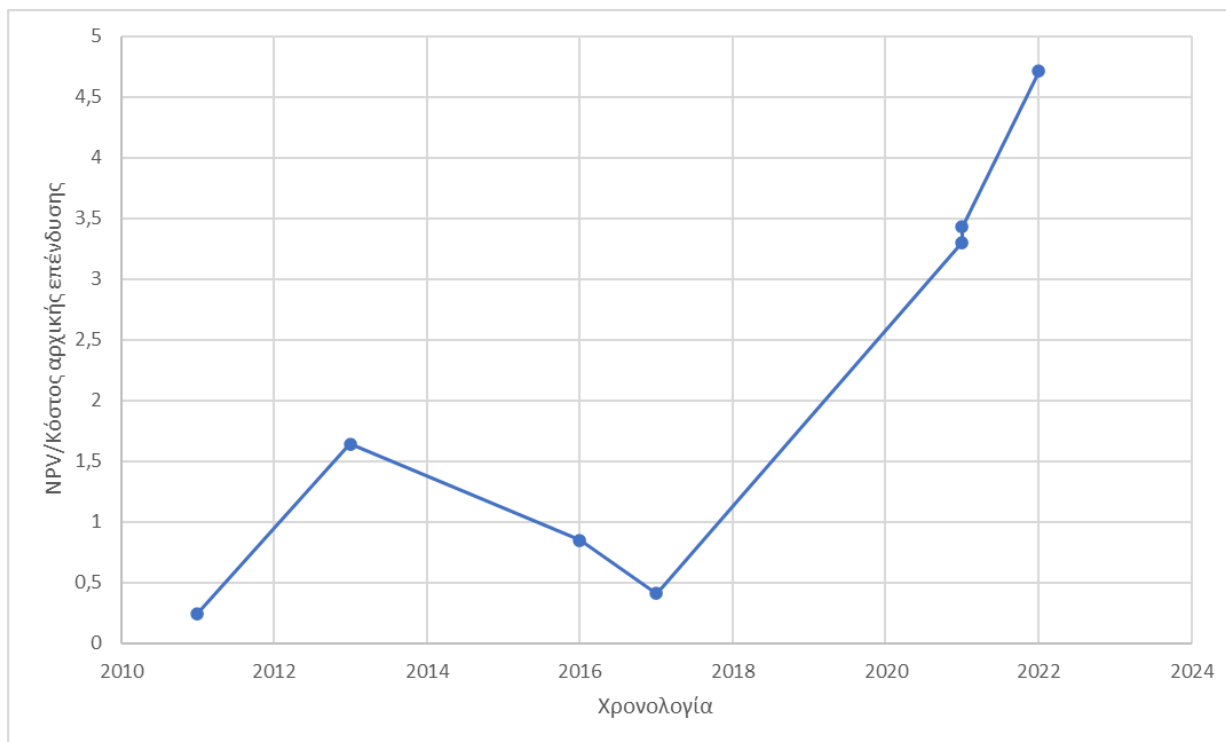
Όλες οι παραπάνω μελέτες δείχνουν ότι υπάρχει οικονομικό όφελος στην παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο. Επομένως είναι σκόπιμη η διερεύνηση οικονομικής σκοπιμότητας κατασκευής μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών. Φαίνεται σημαντική διακύμανση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV), της ετήσιας παραγωγής βιοαερίου και του αρχικού κόστους επένδυσης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ετήσιας παραγωγής βιοαερίου και καθαρής παρούσας αξίας επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ετήσιας παραγωγής βιοαερίου και καθαρής παρούσας αξίας επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο

Παρατηρείται αυξημένο οικονομικό όφελος για μεγάλη παραγωγή βιοαερίου. Φαίνεται, λοιπόν τόσο πιο σκόπιμη η επένδυση όσο μεγαλύτερη είναι η δυναμικότητα μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η διαχρονική αυξητική τάση της απόδοσης των επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο.

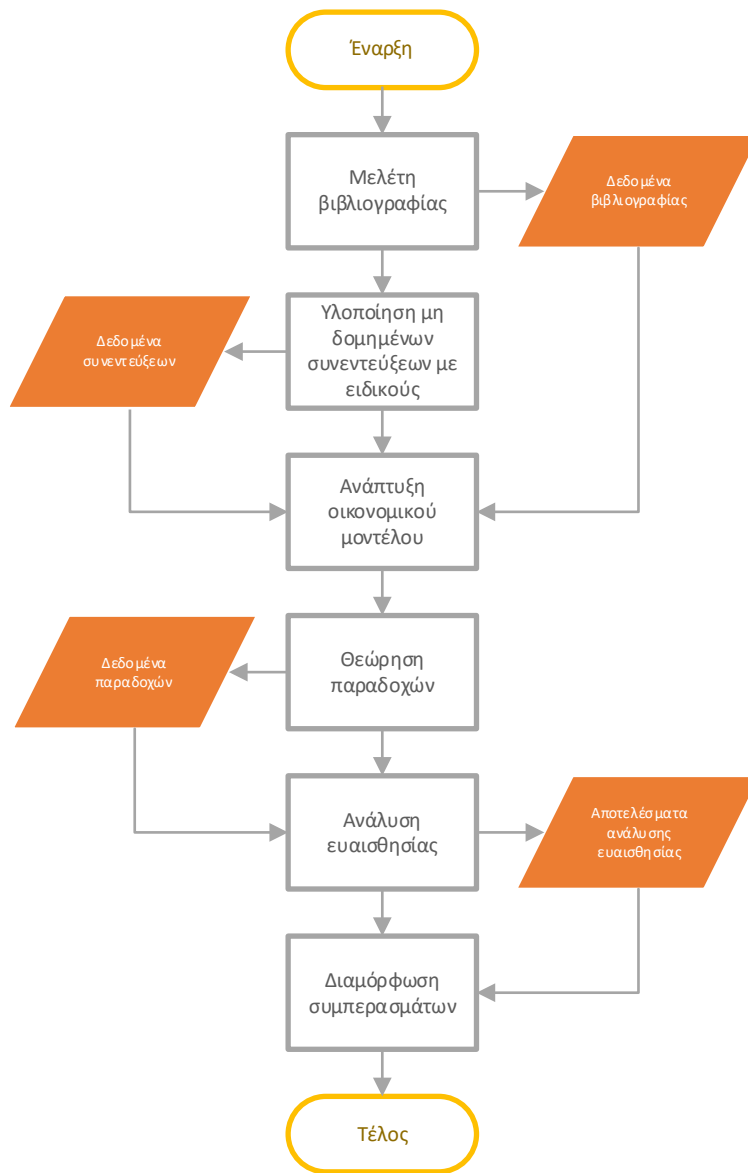


Σχήμα 2: Διάγραμμα διαχρονικής απόδοσης επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο

3. Μέθοδος Έρευνας

Για την εκπόνηση της εργασίας ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μελέτη της βιβλιογραφίας σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο, το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο για το βιοαέριο και τον τρόπο παραγωγής του μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μη δομημένες συνεντεύξεις με ειδικούς για την εύρεση των απαραίτητων για την εργασία μεγεθών που δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν από τη βιβλιογραφία αλλά είχαν άμεση σχέση με τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Εν συνεχεία, τα δεδομένα που ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία και από τις μη δομημένες συνεντεύξεις με τους ειδικούς, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του οικονομικού μοντέλου διερεύνησης της οικονομικής σκοπιμότητας της επένδυσης με τη χρήση του λογισμικού Microsoft Office Excel. Κατόπιν, έγιναν κάποιες παραδοχές σχετικά με μεγέθη τα οποία δεν ήταν δυνατόν να καθοριστούν βάσει των δεδομένων από τη βιβλιογραφία και τις μη δομημένες συνεντεύξεις. Αφού έγιναν οι παραδοχές αυτές, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες παραμέτρους με αβέβαιες τιμές, κατά παράμετρο αλλά και συνολικά με τη μέθοδο Monte Carlo με χρήση του λογισμικού Vose Model Risk σε συνδυασμό με το Microsoft Office Excel. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του οικονομικού μοντέλου και της ανάλυσης ευαισθησίας διαμορφώθηκαν τα συμπεράσματα σχετικά με την οικονομική σκοπιμότητα της επένδυσης.

Η διαδικασία εκπόνησης της εργασίας αποικονίζεται σχηματικά με ένα διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής εργασίας

4. Οικονομοτεχνική μελέτη

4.1 Γενική περιγραφή

Η μελέτη σκοπιμότητας αφορά την κατασκευή και λειτουργία μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, στην περιοχή των Ιωαννίνων. Στην περιοχή της μονάδας, υπάρχει μεγάλος αριθμός πτηνοτροφικών μονάδων. Η παραγωγή του βιοαερίου πραγματοποιείται με την αναερόβια χώνευση των πτηνοτροφικών αποβλήτων, τα οποία συλλέγονται από τα πτηνοτροφεία που υπάρχουν στην περιοχή. Λόγω της σχετικά μεγάλης διασποράς τους, κρίνεται αναγκαία η κατασκευή σταθμών μεταφόρτωσης για τη μεταφορά των αποβλήτων στη μονάδα. Εκτιμάται ότι απαιτείται η κατασκευή πέντε σταθμών μεταφόρτωσης. Από την αναερόβια χώνευση της ποσότητας των αποβλήτων που μεταφέρονται τελικά στην μονάδα, παράγεται το βιοαέριο και το χωνευμένο υπόλειμμα (κομπόστ). Το βιοαέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία πωλείται στο δίκτυο της ΔΕΗ και το κομπόστ πωλείται ως βιολογικό λίπασμα. Η ηλεκτρική ισχύς της μονάδας εκτιμάται ότι είναι 14 MW.

4.2 Εκτίμηση παραγωγής

4.2.1 Παραγωγή βιοαερίου

Οι ετήσια διαθέσιμη ποσότητα πτηνοτροφικών αποβλήτων στην περιοχή είναι 230.000 τόνοι. Εκτιμάται ότι ένα ποσοστό αυτών των αποβλήτων είναι δυνατόν να μεταφερθεί στη μονάδα και το ποσοστό αυτό είναι ένας από τους παράγοντες που διερευνώνται περεταίρω στην ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται παρακάτω. Η ποσότητα αποβλήτων που θεωρείται, προς το παρόν, ότι αξιοποιείται στη μονάδα φαίνεται στον Πίνακα 5. Η παραγωγή βιοαερίου εξαρτάται άμεσα από το είδος της ύλης, λόγω της διαφορετικής ποσόστωσης σε οργανική ξηρή ύλη. Ο υπολογισμός της συνολικής ετήσιας παραγωγής βιοαερίου έγινε σύμφωνα με μία προτεινόμενη από τη βιβλιογραφία μεθοδολογία (Fardin, de Barros and Dias, 2018), η οποία περιγράφεται στη συνέχεια:

Η ξηρή ουσία (dry matter) ή αλλιώς το σύνολο των στερεών (total of solids) στο υπόστρωμα εκφράζεται ως ποσοστό TS% της συνολικής βιομάζας.

Η οργανική ύλη (organic matter) ή αλλιώς το σύνολο των πτητικών στερεών (volatile solids) εκφράζεται ως ποσοστό VS% της ξηρής ουσίας.

Το βιοαέριο προκύπτει από την οργανική ξηρή ύλη (organic dry matter), η οποία εκφράζεται ως το γινόμενο $\text{OrgDryMat \%} = \text{DryMat \%} * \text{OrgMat \%}$.

Το παραγόμενο βιοαέριο ανά Kg ξηρής οργανικής ύλης, μετρούμενο σε m^3 , πολλαπλασιάζεται με το παραπάνω ποσοστό και την ετήσια ποσότητα της βιομάζας και δίνει την ετήσια παραγωγή βιοαερίου.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που σχετίζονται με την παραγωγή του βιοαερίου και τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Η συνολική ετήσια παραγωγή βιοαερίου είναι 8.740.000 m³.

Πίνακας 5: Παραγωγή βιοαερίου

	Πτηνοτροφικά απόβλητα
Ποσότητα αποβλήτων που παράγονται ετησίως στην περιφέρεια (t)	230.000
Συντελεστής αξιοποίησης στη μονάδα %	40%
Ποσότητα αποβλήτων που αξιοποιούνται στη μονάδα (t)	92.000
Ξηρή ουσία (dry matter) - TS%	25,0%
Ποσοστό της ξηρής ουσίας σε πτητικά στερεά - VS%	80%
Ξηρή οργανική ύλη - dry organic matter (t)	18.400
Παραγόμενο βιοάεριο ανά Kg ξηρής οργανικής ύλης (m ³)	0,48
Παραγόμενο βιοάεριο ανά τόνο ξηρής οργανικής ύλης (m ³)	475
Ετήσια παραγωγή βιοαερίου (m ³)	8.740.000

4.2.2 Παραγωγή βιολογικού λιπάσματος

Παράγωγο της αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων που συλλέγονται τελικά, είναι και το κομπόστ, το οποίο πωλείται ως βιολογικό λίπασμα. Το 40% της ξηρής ουσίας (dry matter) παραμένει υπόλοιπο ως λίπασμα. Λαμβάνοντας δεδομένα από τον Πίνακα 5 και πολλαπλασιάζοντας τα ποσοστά TS% με τις ποσότητες αποβλήτων που αξιοποιούνται στη μονάδα, προκύπτει συνολική ετήσια παραγωγή λιπάσματος ίση με 9.200 t.

4.3 Οικονομική ανάλυση

4.3.1 Κόστος επένδυσης

Το κόστος της επένδυσης συνίσταται στην αγορά του οικοπέδου της μονάδας και των σταθμών μεταφόρτωσης, στην κατασκευή κτηριακών εγκαταστάσεων, στην αγορά του απαιτούμενου εξοπλισμού και στις απαιτούμενες μελέτες. Τα κύρια τμήματα που περιλαμβάνει η μονάδα παραγωγής βιοαερίου είναι η δεξαμενή αποθήκευσης της α' ύλης, ο βιοαντιδραστήρας ή αλλιώς χωνευτήρας, όπου παράγεται και το βιοάεριο, δύο διαφορετικές δεξαμενές

αποθήκευσης για το παραγόμενο βιοαέριο και το χωνευμένο υπόλειμμα (κομπόστ) και τέλος η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 6 δίνει μια επισκόπηση των εκτιμήσεων για τις δαπάνες της επένδυσης.

Πίνακας 6: Κόστος επένδυσης

Εδαφικές εκτάσεις (οικόπεδο μονάδας και σταθμών μεταφόρτωσης)	300.000 €
Βιομηχανικές εγκαταστάσεις (κτήρια)	16.000.000 €
Σταθμοί μεταφόρτωσης (κτήρια)	2.000.000 €
Μηχανήματα και εξοπλισμός μονάδας και σταθμών μεταφόρτωσης	27.000.000 €
Μελέτες	150.000 €
Συνολικό κόστος επένδυσης	45.450.000 €

4.3.2 Χρηματοδότηση επένδυσης

Η χρηματοδότηση της επένδυσης γίνεται σε κάποιο ποσοστό με ίδια κεφάλαια και σε κάποιο ποσοστό με δανεισμό. Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι τιμές που λαμβάνονται για τα παραπάνω ποσοστά, καθώς και τα αντίστοιχα ποσά.

Πίνακας 7: Χρηματοδότηση επένδυσης

Χρηματοδότηση	Ποσοστό	Ποσό
Ίδια κεφάλαια	20%	9.090.000 €
Δανεισμός	80%	36.360.000 €
Σύνολο επένδυσης		45.450.000 €

4.3.3 Υπολογισμός δανείου

Παρακάτω γίνεται ο υπολογισμός των δόσεων του δανείου κατά έτος. Το ύψος του αρχικού δανείου ανέρχεται σε 36.360.000 €. Το ετήσιο επιτόκιο δανεισμού είναι 3,38%, ενώ ως διάρκεια αποπληρωμής του δανείου λαμβάνονται τα 15 έτη. Ως τρόπος εξόφλησης λαμβάνεται η μέθοδος των μηνιαίων ισόποσων τοκοχρεωλυτικών δόσεων. Στον Πίνακα 8 φαίνεται η ανάλυση του δανείου κατά έτος.

Πίνακας 8: Υπολογισμός δανείου

Έτος επένδυσης	Τοκοχρεωλυτική δόση	Τόκοι έτους	Χρεωλύσια έτους
0			
1			
2	3.130.078 €	1.228.968 €	1.901.110 €
3	3.130.078 €	1.164.710 €	1.965.367 €
4	3.130.078 €	1.098.281 €	2.031.797 €
5	3.130.078 €	1.029.606 €	2.100.472 €
6	3.130.078 €	958.610 €	2.171.468 €
7	3.130.078 €	885.215 €	2.244.863 €
8	3.130.078 €	809.338 €	2.320.740 €
9	3.130.078 €	730.897 €	2.399.181 €
10	3.130.078 €	649.805 €	2.480.273 €
11	3.130.078 €	565.972 €	2.564.106 €
12	3.130.078 €	479.305 €	2.650.773 €
13	3.130.078 €	389.709 €	2.740.369 €
14	3.130.078 €	297.085 €	2.832.993 €
15	3.130.078 €	201.329 €	2.928.749 €
16	3.130.078 €	102.338 €	3.027.740 €

4.3.4 Κόστος λειτουργίας

Στον Πίνακα 9 δίνεται μία εκτίμηση για τα ετήσια κόστη λειτουργίας. Το κόστος μεταφοράς της α' ύλης εκτιμάται 24,11 € ανά τόνο α' ύλης. Ο αριθμός των εργαζομένων εκτιμάται στα 15 άτομα και ο μισθός τους 2.000 €. Η ασφάλιση υπολογίζεται στο 0,75 % του συνολικού κόστους επένδυσης (ανά έτος). Το κόστος συντήρησης υπολογίζεται στο 3 % του συνολικού κόστους επένδυσης.

Πίνακας 9: Κόστος λειτουργίας

Λειτουργικό κόστος	Ποσό
Κόστος συντήρησης	1.363.500 €
Κόστος μεταφοράς α' ύλης	2.218.483 €
Μισθοί εργαζομένων	360.000 €
Ασφάλιση	340.875 €
Νερό, ρεύμα και λοιπά λειτουργικά κόστη	60.000 €
Σύνολο ετήσιου κόστους λειτουργίας	4.342.858 €

4.3.5 Αποσβέσεις

4.3.5.1 Γενικά στοιχεία

Όσον αφορά στις αποσβέσεις, ακολουθείται η μέθοδος της σταθερής απόσβεσης. Ανάλογα με το είδος του στοιχείου της επένδυσης, ο συντελεστής απόσβεσης διαφοροποιείται, σύμφωνα με τον νόμο Ν.4110/2013. Στον Πίνακα 10 φαίνονται ο συντελεστής απόσβεσης κάθε μέρους της επένδυσης, καθώς και τα έτη απόσβεσης.

Πίνακας 10: Αποσβέσεις

Επένδυση	Κόστος	Συντελεστής απόσβεσης	Έτη απόσβεσης
Εδαφικές εκτάσεις (οικόπεδο μονάδας και σταθμών μεταφόρτωσης)	300.000 €	0%	0
Βιομηχανικές εγκαταστάσεις (κτήρια)	16.000.000 €	4%	25
Σταθμοί μεταφόρτωσης	2.000.000 €	4%	25
Μηχανήματα και εξοπλισμός μονάδας και σταθμών μεταφόρτωσης	27.000.000 €	10%	10
Μελέτες	150.000 €	0%	0

4.3.5.2 Σύνολο απόσβεσης κατά έτος

Στον Πίνακα 11 φαίνεται η συνολική απόσβεση κατά έτος, αθροίζοντας όλες τις επιμέρους αποσβέσεις.

Πίνακας 11: Σύνολο απόσβεσης κατά έτος

Έτος	Απόσβεση
0	0 €
1	0 €
2	3.420.000 €
3	3.420.000 €
4	3.420.000 €
5	3.420.000 €
6	3.420.000 €
7	3.420.000 €
8	3.420.000 €
9	3.420.000 €
10	3.420.000 €
11	3.420.000 €
12	720.000 €
13	720.000 €
14	720.000 €
15	720.000 €
16	720.000 €
17	720.000 €

Έτος	Απόσβεση
18	720.000 €
19	720.000 €
20	720.000 €
21	720.000 €
22	720.000 €
23	720.000 €
24	720.000 €
25	720.000 €
26	720.000 €

4.3.6 Ανάλυση εσόδων

Δεδομένου ότι η συνολική ετήσια παραγωγή βιοαερίου είναι 8.740.000 m³ και ότι ανά κυβικό μέτρο βιοαερίου παράγονται 6 KWh ηλεκτρικής ενέργειας, η συνολική θεωρητικά παραγόμενη ενέργεια ανά έτος είναι 52.440.000 KWh. Ο συντελεστής απόδοσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται 80 %. Επομένως, η πραγματική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 41.952.000 KWh. Η τιμή πώλησης της MWh στο δίκτυο της ΔΕΗ είναι 200 €, σύμφωνα με τον Ν.3851/2010 για μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο που προέρχεται από βιομάζα με εγκατεστημένη ισχύ > 3 MW. Επομένως, τα ετήσια έσοδα από την πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται στα 8.390.400 €.

Η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος λαμβάνεται στα 180 € ανά τόνο. Η συνολική ποσότητα βιολογικού λιπάσματος που παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση της α' ύλης είναι 9.200 t. Τα υπολογιζόμενα ετήσια έσοδα από την πώληση του βιολογικού λιπάσματος είναι 1.656.000 €.

Ο Πίνακας 12 δίνει μία επισκόπηση της ανάλυσης των εσόδων σε ετήσια βάση, σε όλον τον χρονικό ορίζοντα της επένδυσης.

Πίνακας 12: Ανάλυση εσόδων κατά έτος

Έτος	Τιμή πώλησης MWh	Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	Έσοδα από πώληση λιπάσματος	Συνολικά έσοδα έτους
0					
1					
2	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
3	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
4	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
5	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
6	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
7	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
8	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
9	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
10	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
11	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
12	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
13	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
14	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
15	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
16	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
17	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
18	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
19	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €

Έτος	Τιμή πώλησης MWh	Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (MWh)	Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	Έσοδα από πώληση λιπάσματος	Συνολικά έσοδα έτους
20	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
21	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
22	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
23	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
24	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
25	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €
26	200 €	41.952,00	8.390.400 €	1.656.000 €	10.046.400 €

4.3.7 Δείκτες απόδοσης επένδυσης

Με δεδομένα τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων, γίνεται ανάλυση της βιωσιμότητας και κερδοφορίας της επένδυσης. Η επένδυση εξετάζεται με χρονικό ορίζοντα εικοσιπενταετίας, μέσω του υπολογισμού των βασικών οικονομικών δεικτών (NPV, IRR, Payback Period, ROI). Ο φορολογικός συντελεστής για τα κέρδη είναι 22%, σύμφωνα με τον νόμο Ν.4172/2013.

Καθαρή παρούσα αξία (NPV): 37.127.414 €

Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR): 25,39%

Συντελεστής απόδοσης επένδυσης (ROI): 842%

Περίοδος αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου (Payback Period): 6

Πίνακας 13: Ετήσιες χρηματοροές

Έτος	Αρχική επένδυση	Χρεολύσια	Έσοδα	Κόστη λειτουργίας	Μεικτά αποτελέσματα (EBITDA)	Τόκοι δανείων	Αποσβέσεις	Καθαρά αποτελέσματα προ φόρων	Φόροι	Καθαρές ροές
0										
1	9.090.000 €									-9.090.000 €
2		1.901.110 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	1.228.968 €	3.420.000 €	1.054.574 €	232.006 €	2.341.458 €
3		1.965.367 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	1.164.710 €	3.420.000 €	1.118.832 €	246.143 €	2.327.321 €
4		2.031.797 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	1.098.281 €	3.420.000 €	1.185.261 €	260.757 €	2.312.707 €
5		2.100.472 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	1.029.606 €	3.420.000 €	1.253.936 €	275.866 €	2.297.598 €
6		2.171.468 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	958.610 €	3.420.000 €	1.324.932 €	291.485 €	2.281.979 €
7		2.244.863 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	885.215 €	3.420.000 €	1.398.327 €	307.632 €	2.265.832 €
8		2.320.740 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	809.338 €	3.420.000 €	1.474.204 €	324.325 €	2.249.139 €
9		2.399.181 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	730.897 €	3.420.000 €	1.552.645 €	341.582 €	2.231.882 €
10		2.480.273 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	649.805 €	3.420.000 €	1.633.737 €	359.422 €	2.214.042 €
11		2.564.106 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	565.972 €	3.420.000 €	1.717.570 €	377.865 €	2.195.599 €
12		2.650.773 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	479.305 €	720.000 €	4.504.237 €	990.932 €	1.582.532 €
13		2.740.369 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	389.709 €	720.000 €	4.593.833 €	1.010.643 €	1.562.821 €
14		2.832.993 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	297.085 €	720.000 €	4.686.458 €	1.031.021 €	1.542.444 €
15		2.928.749 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	201.329 €	720.000 €	4.782.213 €	1.052.087 €	1.521.377 €
16		3.027.740 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	102.338 €	720.000 €	4.881.205 €	1.073.865 €	1.499.599 €
17		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
18		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
19		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
20		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
21		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
22		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
23		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €

Έτος	Αρχική επένδυση	Χρεολύσια	Έσοδα	Κόστη λειτουργίας	Μεικτά αποτελέσματα (EBITDA)	Τόκοι δανείων	Αποσβέσεις	Καθαρά αποτελέσματα προ φόρων	Φόροι	Καθαρές ροές
24		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
25		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €
26		0 €	10.046.400 €	4.342.858 €	5.703.542 €	0 €	720.000 €	4.983.542 €	1.096.379 €	4.607.163 €

4.3.8 Παραδοχές

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, κρίσιμο στάδιο αποτέλεσε η αναζήτηση αριθμητικών τιμών για διάφορα μεγέθη, απαραίτητα για την οικονομική διερεύνηση της επένδυσης. Η αναζήτηση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της μελέτης της βιβλιογραφίας και μέσω των μη δομημένων συνεντεύξεων με τους ειδικούς. Ωστόσο, υπήρξαν παράμετροι για τις οποίες δεν υπήρχαν ακριβή στοιχεία ή τα διαθέσιμα στοιχεία ήταν αβέβαια. Για τον λόγο αυτό έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- το συνολικό κόστος επένδυσης υπολογίζεται στα 45.450.000 € βάσει εκτιμήσεων
- το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια λαμβάνεται στα 20%
- δεν υπάρχει κόστος αγοράς α' ύλης, καθώς αυτή λαμβάνεται από του πτηνοτρόφους προς διευκόλυνσή τους, αφού έτσι απαλλάσσονται από την υπό υγειονομικούς όρους απομάκρυνση των πτηνοτροφικών αποβλήτων
- η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος λαμβάνεται στα 180 €
- ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτροπαραγωγής θεωρείται ότι είναι 80 %
- ο συντελεστής αξιοποίησης της διαθέσιμης ποσότητας πτηνοτροφικών αποβλήτων θεωρείται ότι είναι 40 %

4.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Παρακάτω παρουσιάζεται η πραγματοποιηθείσα ανάλυση ευαισθησίας για τις μεταβλητές της επένδυσης που παρουσιάζουν έντονη αβεβαιότητα, έτσι ώστε να προκύψουν ολοκληρωμένα συμπεράσματα σχετικά με τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Η ανάλυση ευαισθησίας συμπεριλαμβάνει τις παρακάτω μεταβλητές:

- Κόστος επένδυσης
- Συντελεστής αξιοποίησης της διαθέσιμης ποσότητας αποβλήτων
- Τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος
- Συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής
- Ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Για τις παραπάνω μεταβλητές πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, αρχικά ανά παράμετρο, ως προς τους δείκτες απόδοσης και στη συνέχεια συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με τη μέθοδο της προσομοίωσης Monte Carlo για όλες τις παραμέτρους ταυτόχρονα.

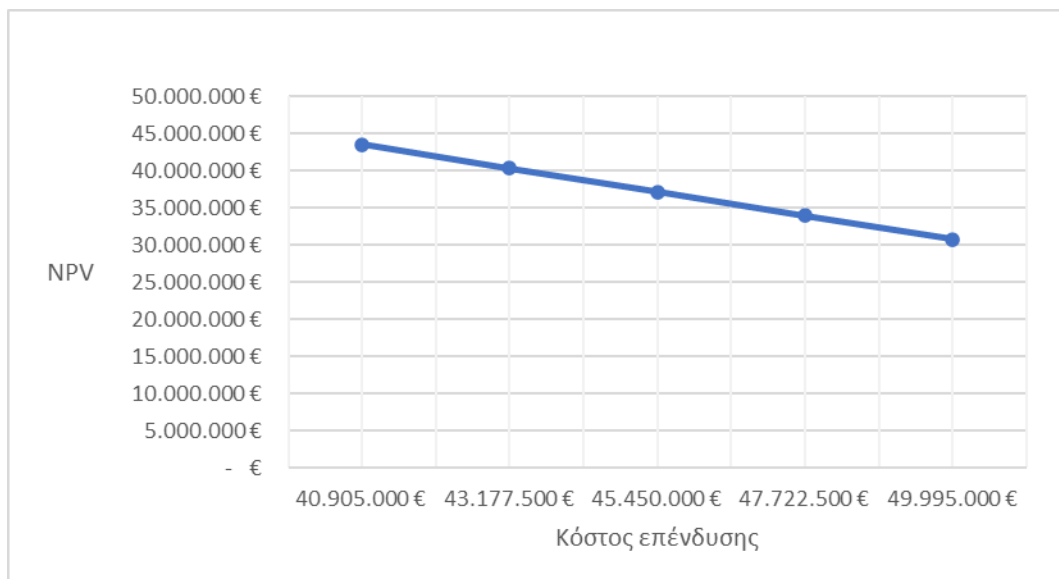
4.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας για το κόστος επένδυσης

Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους δείκτες απόδοσης για εύρος τιμών του συνολικού κόστους επένδυσης $\pm 10\%$ γύρω από την εκτιμώμενη τιμή, με βήμα 5 %. Ο Πίνακας 14 δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 14: Ανάλυση ευαισθησίας για το κόστος επένδυσης

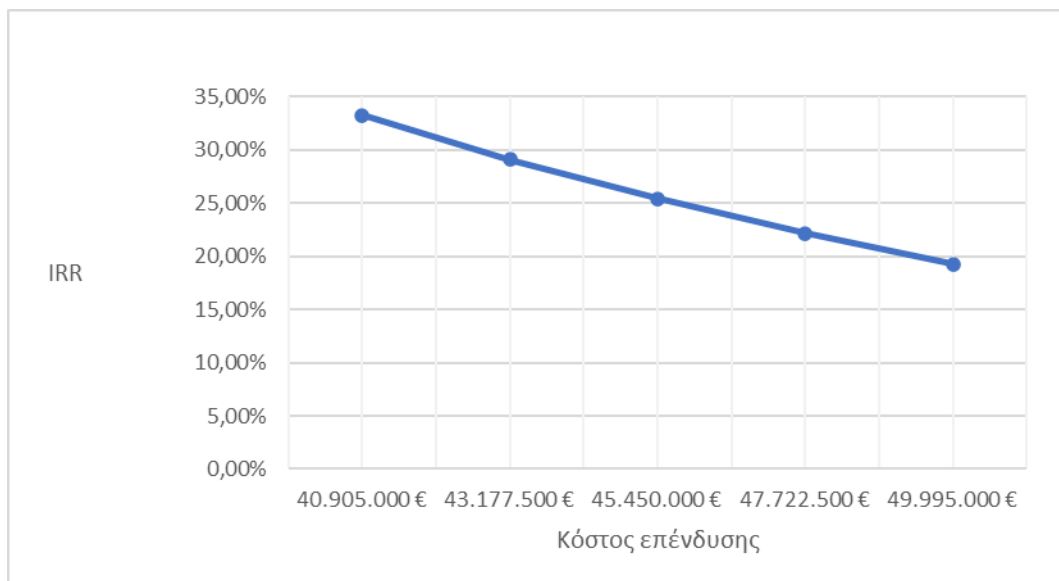
Κόστος επένδυσης	NPV	IRR	ROI	Payback Period
40.905.000 €	43.484.371 €	33,24%	1030%	5
43.177.500 €	40.305.893 €	29,08%	931%	5
45.450.000 €	37.127.414 €	25,39%	842%	6
47.722.500 €	33.948.936 €	22,13%	761%	7
49.995.000 €	30.770.458 €	19,25%	687%	7

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



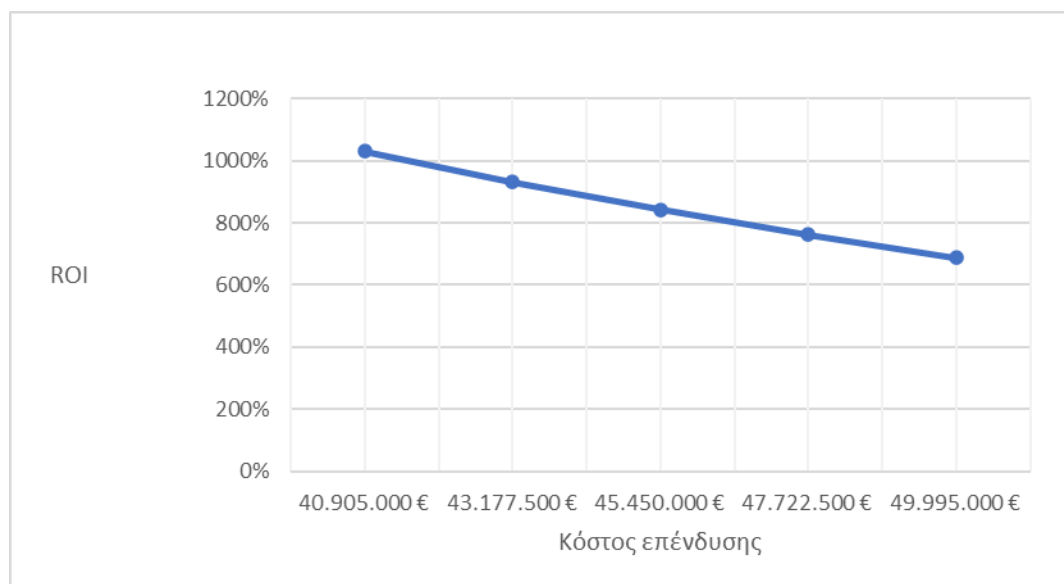
Σχήμα 4: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης

Όσο αυξάνεται το συνολικό κόστος επένδυσης, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει αρκετά υψηλή σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του κόστους επένδυσης.



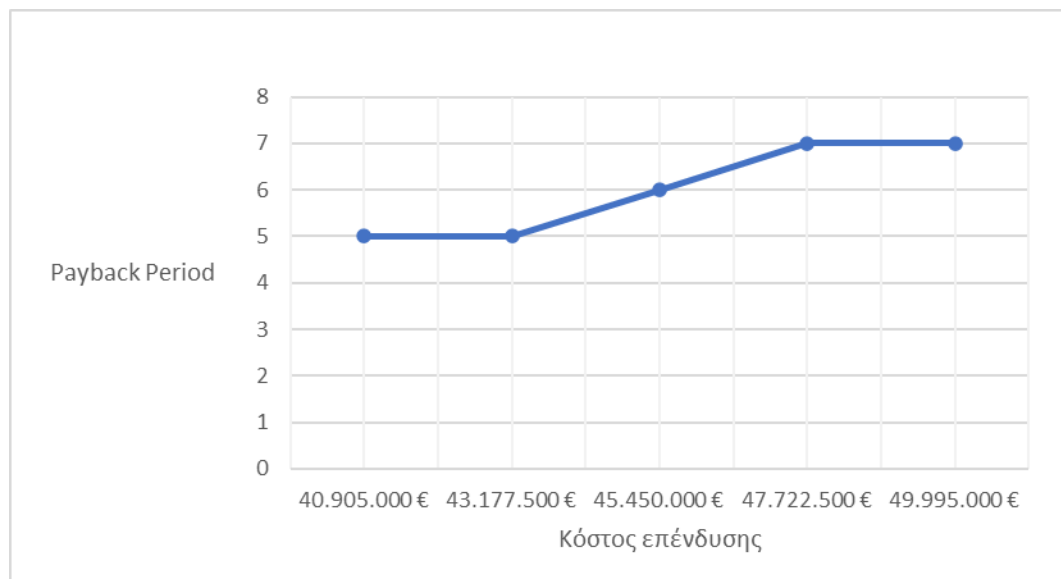
Σχήμα 5: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης

Όσο αυξάνεται το συνολικό κόστος επένδυσης, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει ικανοποιητικά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του κόστους επένδυσης.



Σχήμα 6: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης

Όσο αυξάνεται το συνολικό κόστος επένδυσης, ο Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει αρκετά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του κόστους επένδυσης.



Σχήμα 7: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης

Όσο αυξάνεται το συνολικό κόστος επένδυσης, η Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) είτε παραμένει σταθερή είτε αυξάνεται.

4.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή αξιοποίησης των διαθέσιμων αποβλήτων στη μονάδα

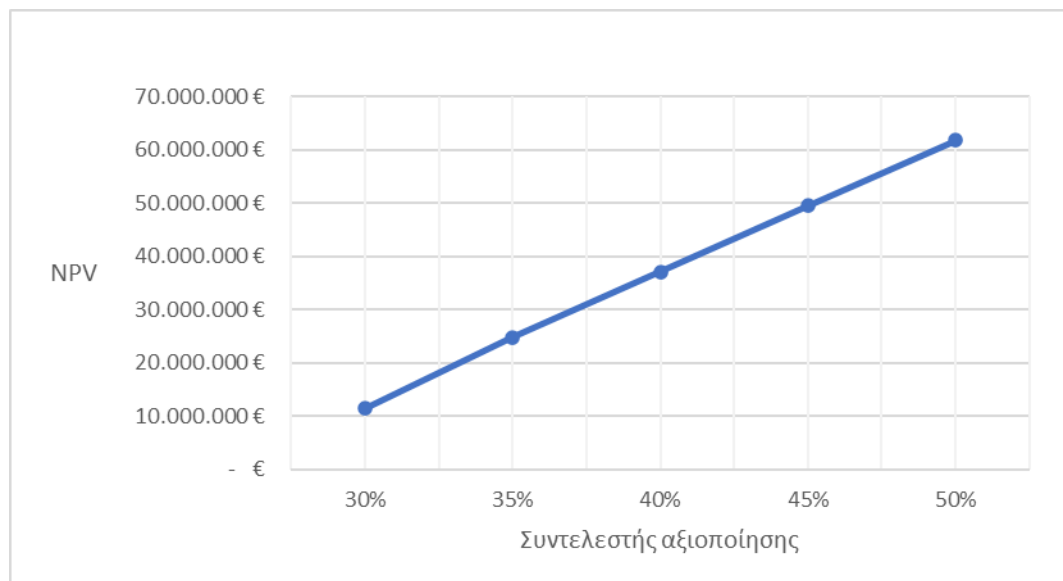
Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους δείκτες απόδοσης για εύρος τιμών του συντελεστή αξιοποίησης των διαθέσιμων αποβλήτων στη μονάδα $\pm 10\%$ γύρω από την εκτιμώμενη τιμή, με βήμα 5 %. Ο Πίνακας 14 δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 15: Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων

Συντελεστής αξιοποίησης	NPV	IRR	ROI	Payback Period
30%	11.393.346 €	9,29%	408%	19
35%	24.799.618 €	17,44%	632%	8
40%	37.127.414 €	25,39%	842%	6
45%	49.455.210 €	33,69%	1051%	5

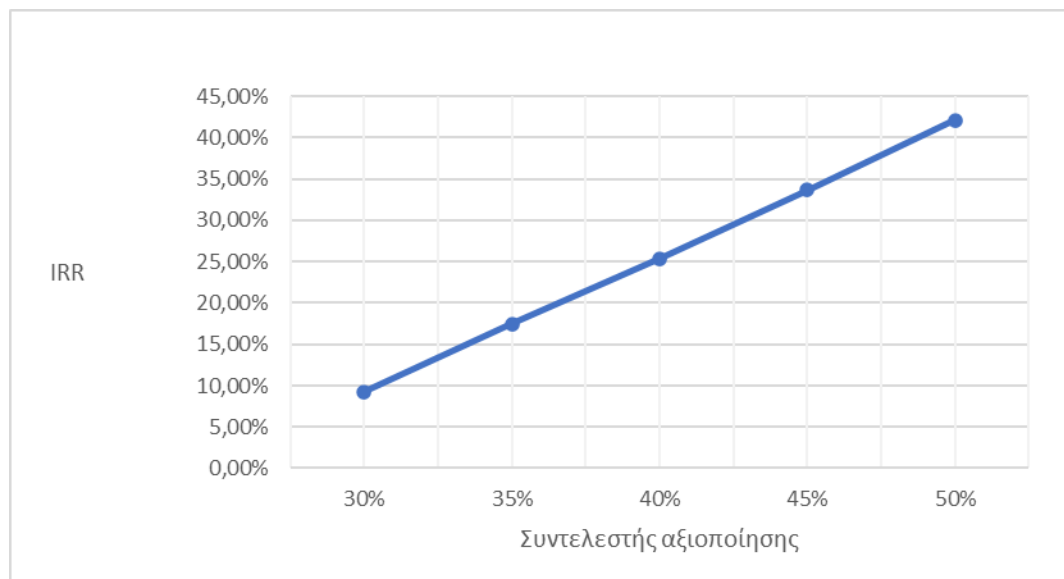
Συντελεστής αξιοποίησης	NPV	IRR	ROI	Payback Period
50%	61.783.007 €	42,13%	1261%	4

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



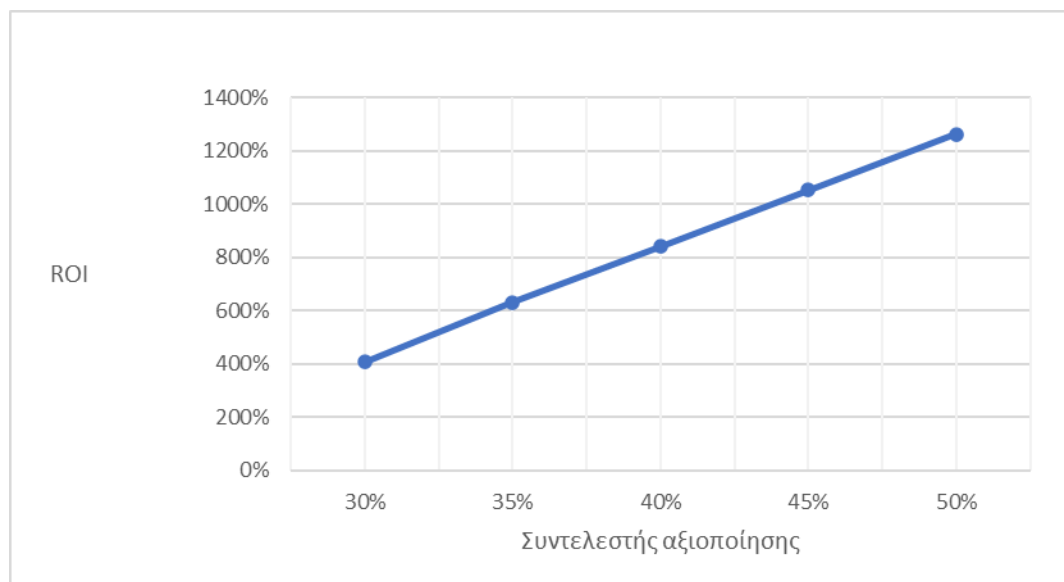
Σχήμα 8: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής αξιοποίησης των αποβλήτων στη μονάδα, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) αυξάνεται. Ακόμα και για τις μικρότερες εκτιμώμενες τιμές του, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) παραμένει σχετικά υψηλή.



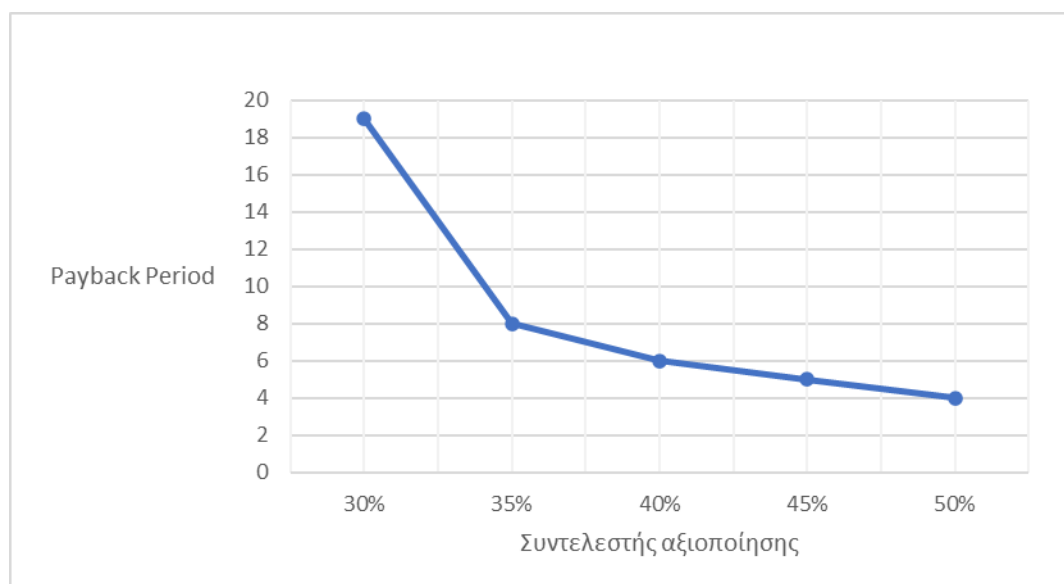
Σχήμα 9: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής αξιοποίησης των αποβλήτων στη μονάδα, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) αυξάνεται.



Σχήμα 10: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής αξιοποίησης αποβλήτων, ο Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI) αυξάνεται. Παραμένει αρκετά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του κόστους επένδυσης, ενώ φτάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές για μεγάλες τιμές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων.



Σχήμα 11: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής αξιοποίησης αποβλήτων, η Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) μειώνεται. Για μικρές τιμές του συντελεστή αξιοποίησης, παρατηρείται σημαντική αύξηση της περιόδου αποπληρωμής.

4.4.3 Ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος

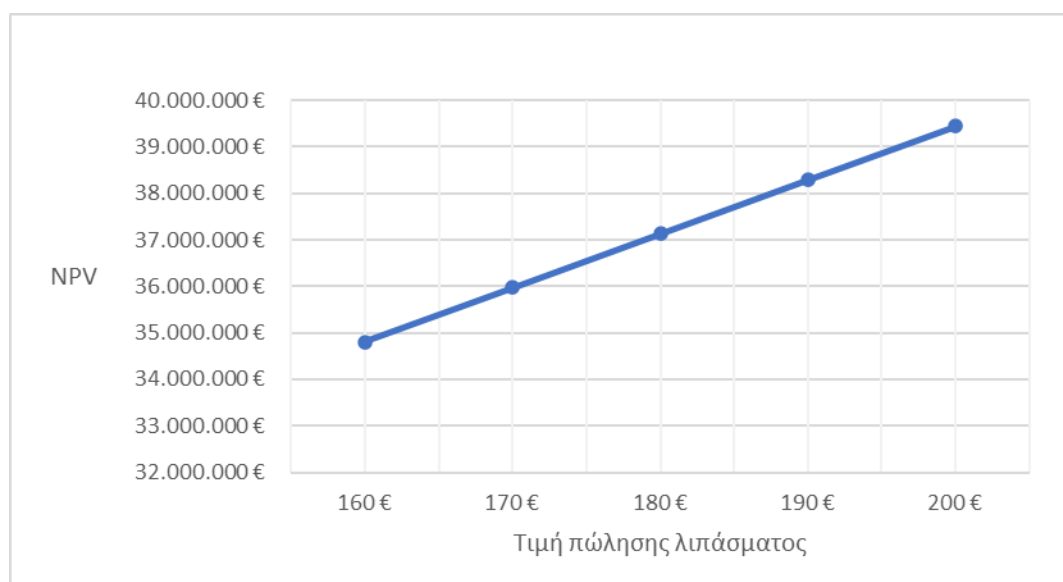
Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους δείκτες απόδοσης για εύρος τιμών της τιμής πώλησης του βιολογικού λιπάσματος ± 20 € γύρω από την εκτιμώμενη τιμή, με βήμα 10 €. Ο Πίνακας 16 δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 16: Ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος

Τιμή πώλησης λιπάσματος	NPV	IRR	ROI	Payback Period
160 €	34.809.235 €	23,86%	802%	6
170 €	35.968.325 €	24,62%	822%	6

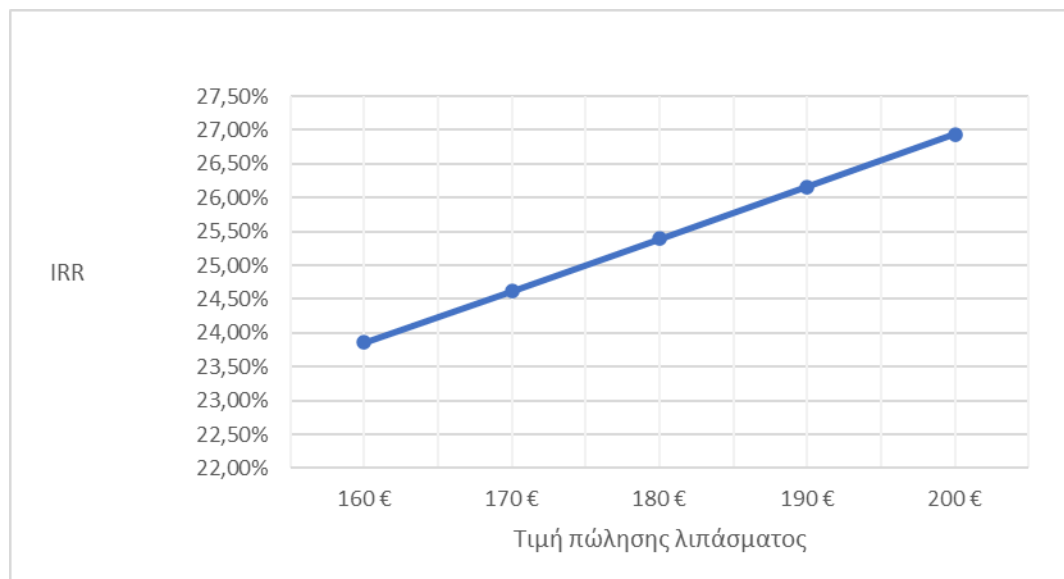
Τιμή πώλησης λιπάσματος	NPV	IRR	ROI	Payback Period
180 €	37.127.414 €	25,39%	842%	6
190 €	38.286.504 €	26,16%	861%	6
200 €	39.445.594 €	26,93%	881%	6

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



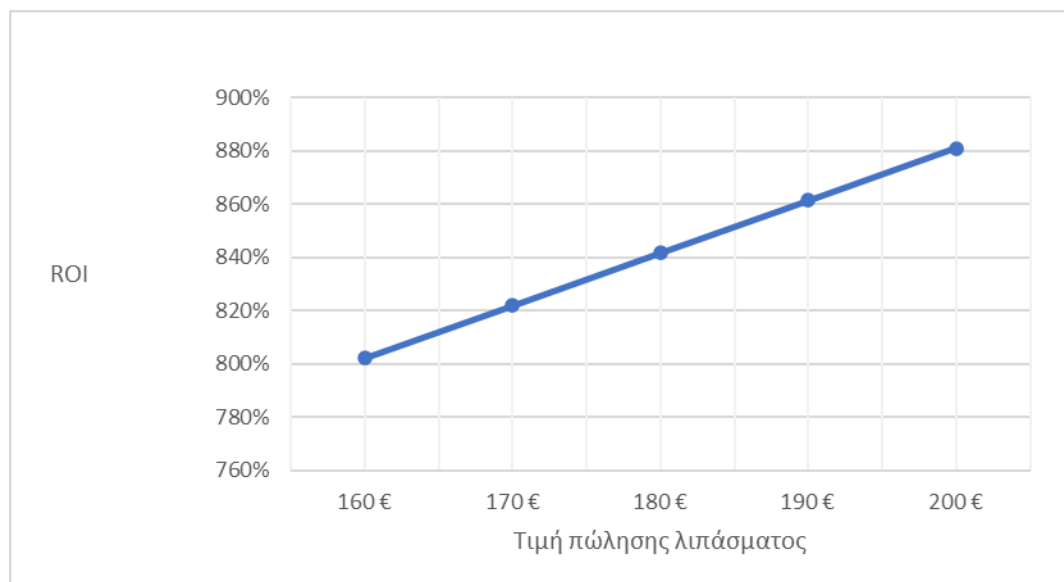
Σχήμα 12: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος

Όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) αυξάνεται. Ακόμα και για τις μικρότερες εκτιμώμενες τιμές του, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) παραμένει υψηλή.



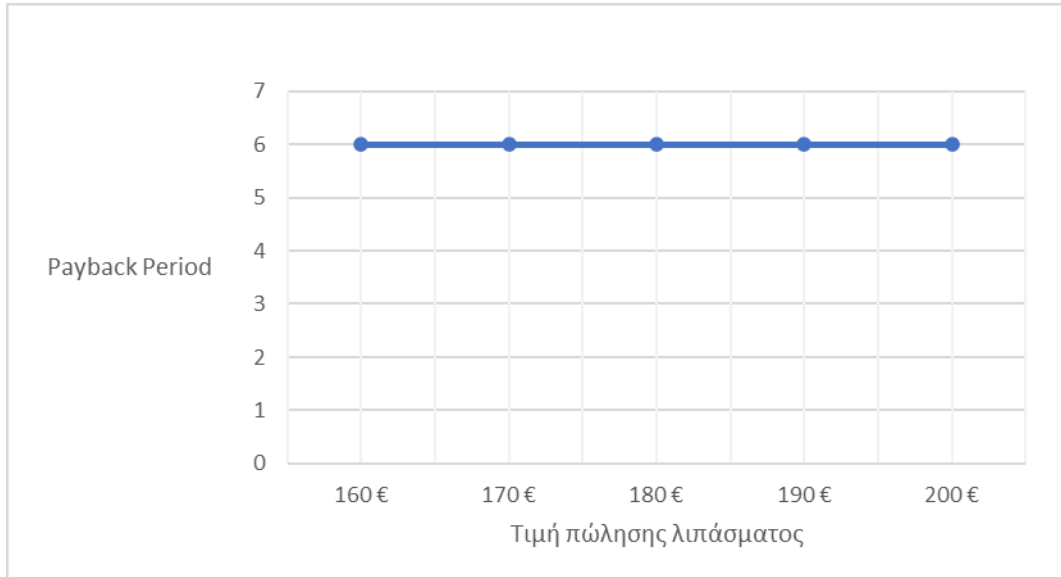
Σχήμα 13: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος

Όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) αυξάνεται. Ωστόσο, δεν παρατηρείται πολύ σημαντική αύξησή του.



Σχήμα 14: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος

Όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος, ο Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI) αυξάνεται. Παραμένει αρκετά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του κόστους επένδυσης. Ωστόσο, δεν παρατηρείται πολύ σημαντική αύξησή του με την αύξηση τις τιμής πώλησης του βιολογικού λιπάσματος.



Σχήμα 15: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος

Ανεξάρτητα από το πόσο αυξάνεται η τιμή πώλησης του βιολογικού λιπάσματος, η Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) παραμένει σταθερή, στο εύρος για το οποίο γίνεται ανάλυση ευαισθησίας.

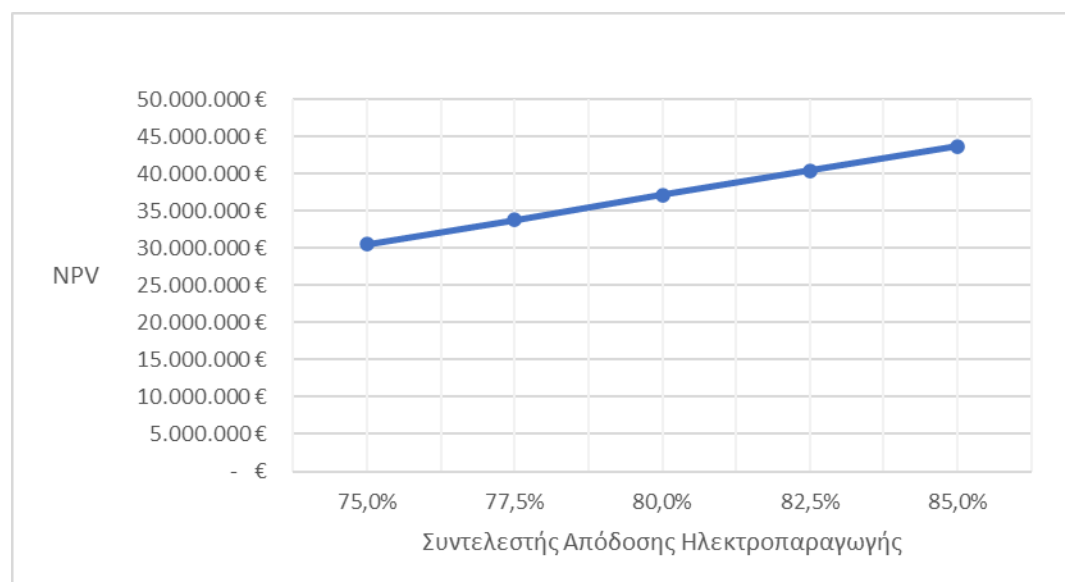
4.4.4 Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους δείκτες απόδοσης για εύρος τιμών του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής $\pm 5\%$ γύρω από την εκτιμώμενη τιμή, με βήμα $2,5\%$. Ο Πίνακας 17 Πίνακας 14 δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 17: Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

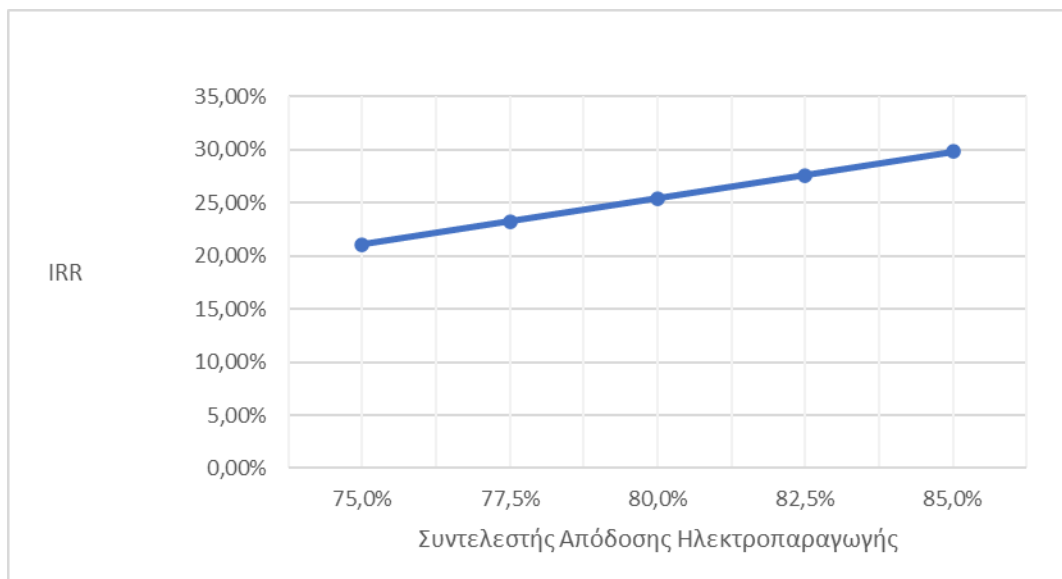
Συντελεστής Απόδοσης Ηλεκτροπαραγωγής	NPV	IRR	ROI	Payback Period
75,0%	30.520.603 €	21,06%	729%	7
77,5%	33.824.009 €	23,21%	785%	6
80,0%	37.127.414 €	25,39%	842%	6
82,5%	40.430.820 €	27,59%	898%	5
85,0%	43.734.225 €	29,81%	954%	5

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



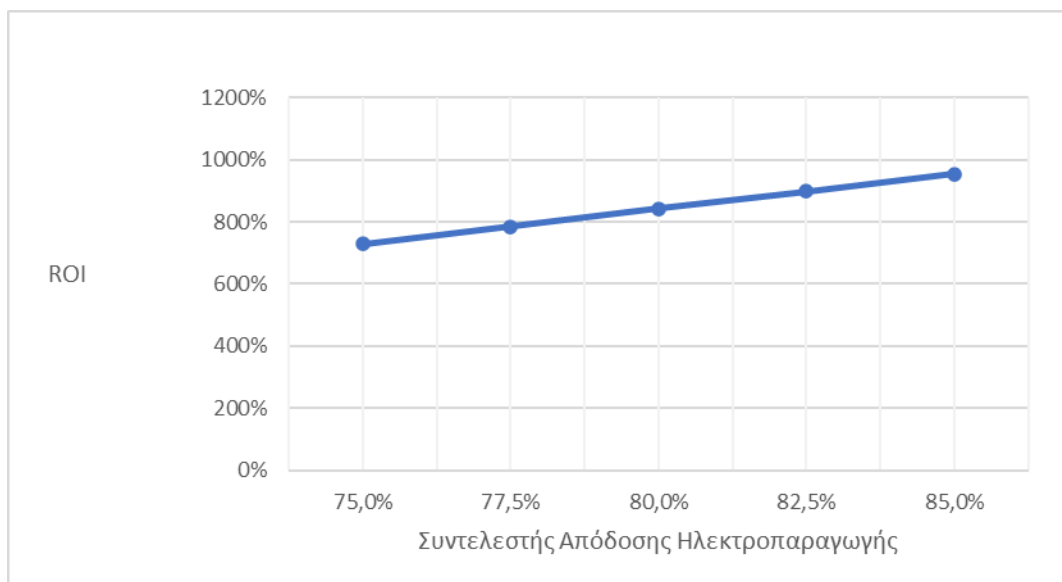
Σχήμα 16: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) αυξάνεται. Ακόμα και για τις μικρότερες εκτιμώμενες τιμές του, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) παραμένει υψηλή.



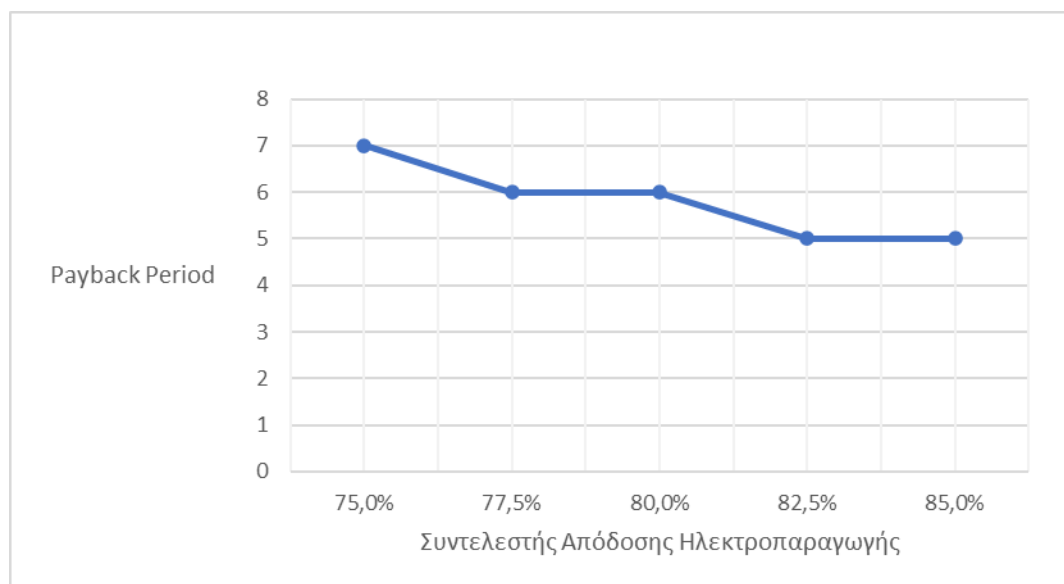
Σχήμα 17: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) αυξάνεται.



Σχήμα 18: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, ο Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI) αυξάνεται. Παραμένει αρκετά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 19: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής

Όσο αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, η Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) μειώνεται ή παραμένει σταθερή.

4.4.5 Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

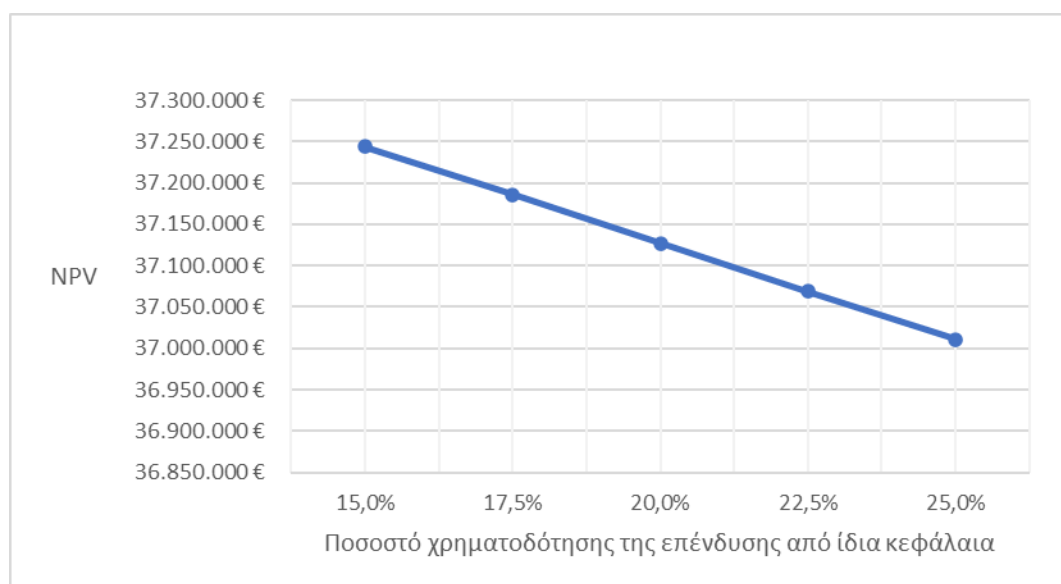
Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους δείκτες απόδοσης για εύρος τιμών του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια $\pm 5\%$ γύρω από την εκτιμώμενη τιμή, με βήμα $2,5\%$. Ο Πίνακας 18 δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 18: Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Ίδια κεφάλαια	NPV	IRR	ROI	Payback Period
15,0%	37.244.135 €	31,13%	1081%	5

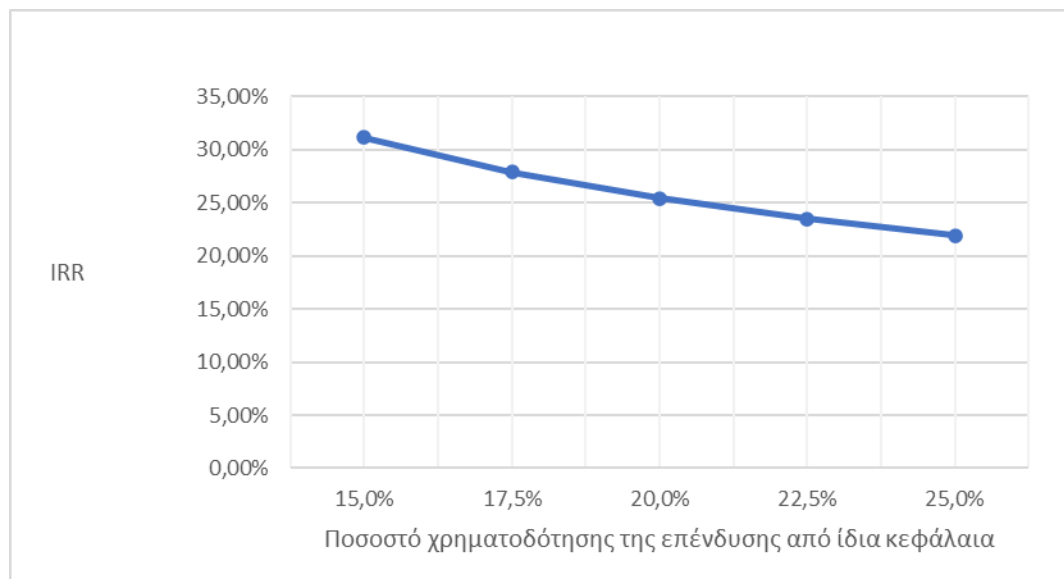
Ίδια κεφάλαια	NPV	IRR	ROI	Payback Period
17,5%	37.185.775 €	27,85%	944%	5
20,0%	37.127.414 €	25,39%	842%	6
22,5%	37.069.054 €	23,47%	762%	6
25,0%	37.010.694 €	21,92%	698%	7

Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



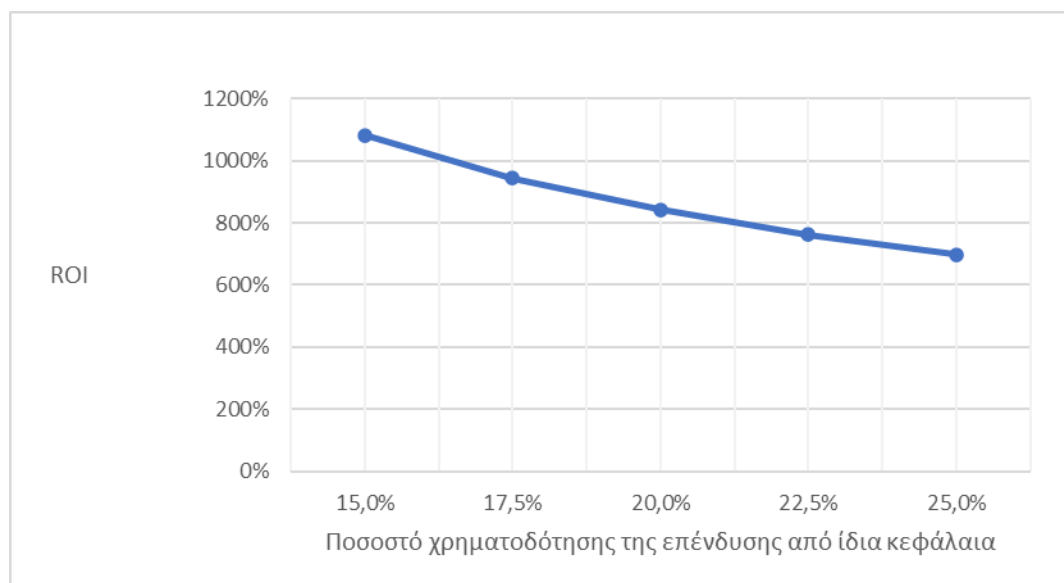
Σχήμα 20: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Όσο αυξάνεται το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια, η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει αρκετά υψηλή σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια.



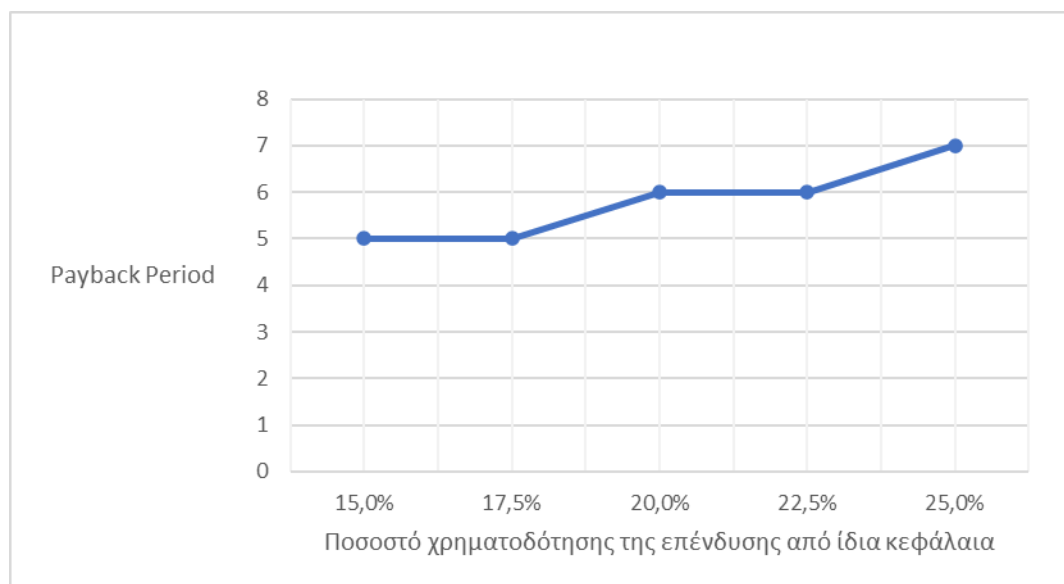
Σχήμα 21: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Όσο αυξάνεται το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει ικανοποιητικά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια.



Σχήμα 22: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Όσο αυξάνεται το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια, ο Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI) μειώνεται. Ωστόσο, παραμένει αρκετά υψηλός σε όλο το εκτιμώμενο εύρος του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια.



Σχήμα 23: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια

Όσο αυξάνεται το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια, η Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) είτε παραμένει σταθερή είτε αυξάνεται.

4.4.6 Συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo

Παρακάτω παρουσιάζεται η πραγματοποιηθείσα συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με τη μέθοδο της προσομοίωσης Monte Carlo για όλες τις παραμέτρους ταυτόχρονα. Η ανάλυση ευαισθησίας συμπεριλαμβάνει τις παρακάτω μεταβλητές:

- Κόστος επένδυσης: χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κατανομή με όρια $\pm 10\%$ από τη μέση τιμή
- Συντελεστής αξιοποίησης της διαθέσιμης ποσότητας αποβλήτων: χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κατανομή με ελάχιστη τιμή το 30% και μέγιστη τιμή το 50%
- Τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος: χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κατανομή με όρια $\pm 10\%$ από τη μέση τιμή
- Συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής: χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κατανομή με όρια $\pm 5\%$ από τη μέση τιμή

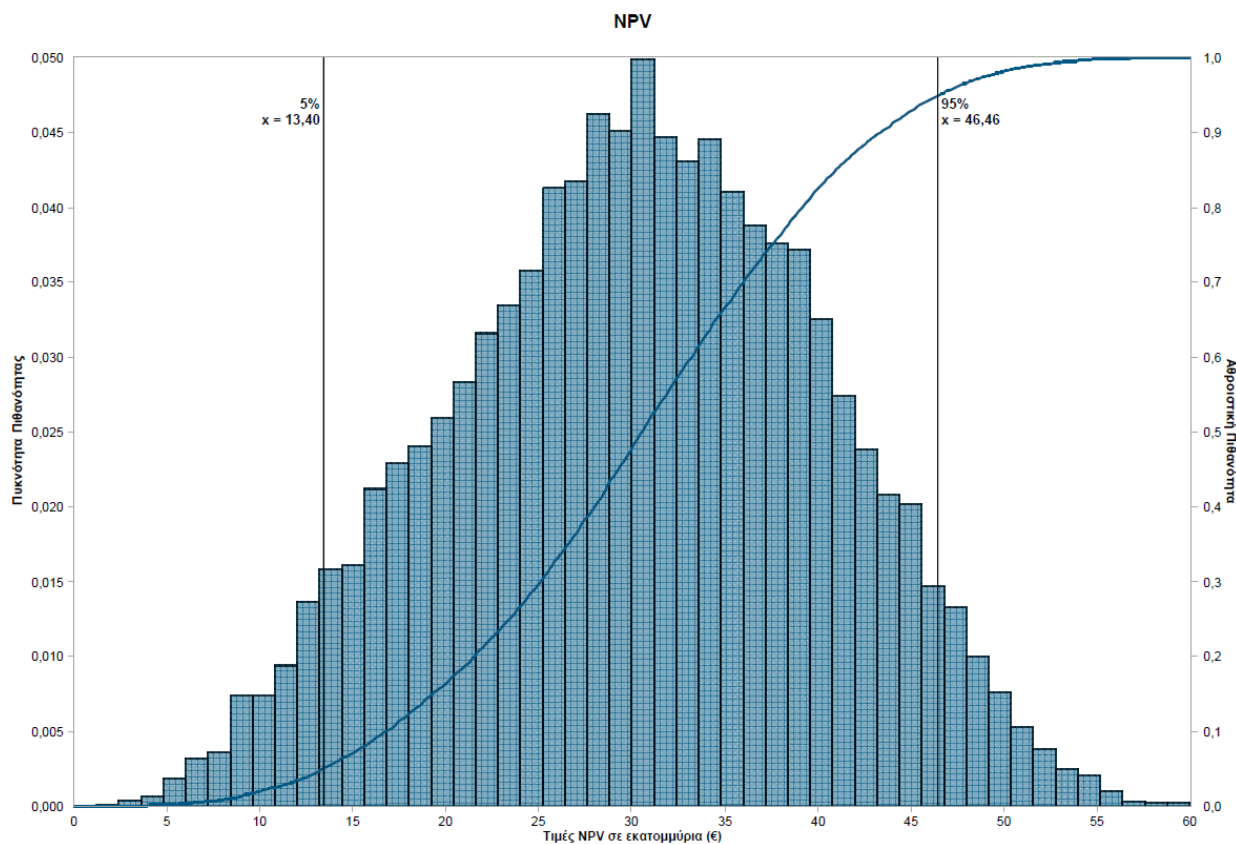
- Ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια: χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κατανομή με όρια $\pm 5\%$ από τη μέση τιμή

Πίνακας 19: Μεταβλητές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με προσομοίωση Monte Carlo

Μεταβλητή	Ελάχιστη Τιμή	Μέση Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Κόστος επένδυσης	40.905.000 €	45.450.000 €	49.995.000 €
Συντελεστής αξιοποίησης	30%	40%	50%
Τιμή πώλησης λιπάσματος	162 €	180 €	198 €
Συντελεστής απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής	75%	80%	85%
Ίδια κεφάλαια	15%	20%	25%

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης με τη μέθοδο Monte Carlo χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Vose Model Risk σε συνδυασμό με το Microsoft Office Excel. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo και 10.000 επαναλήψεις παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα.

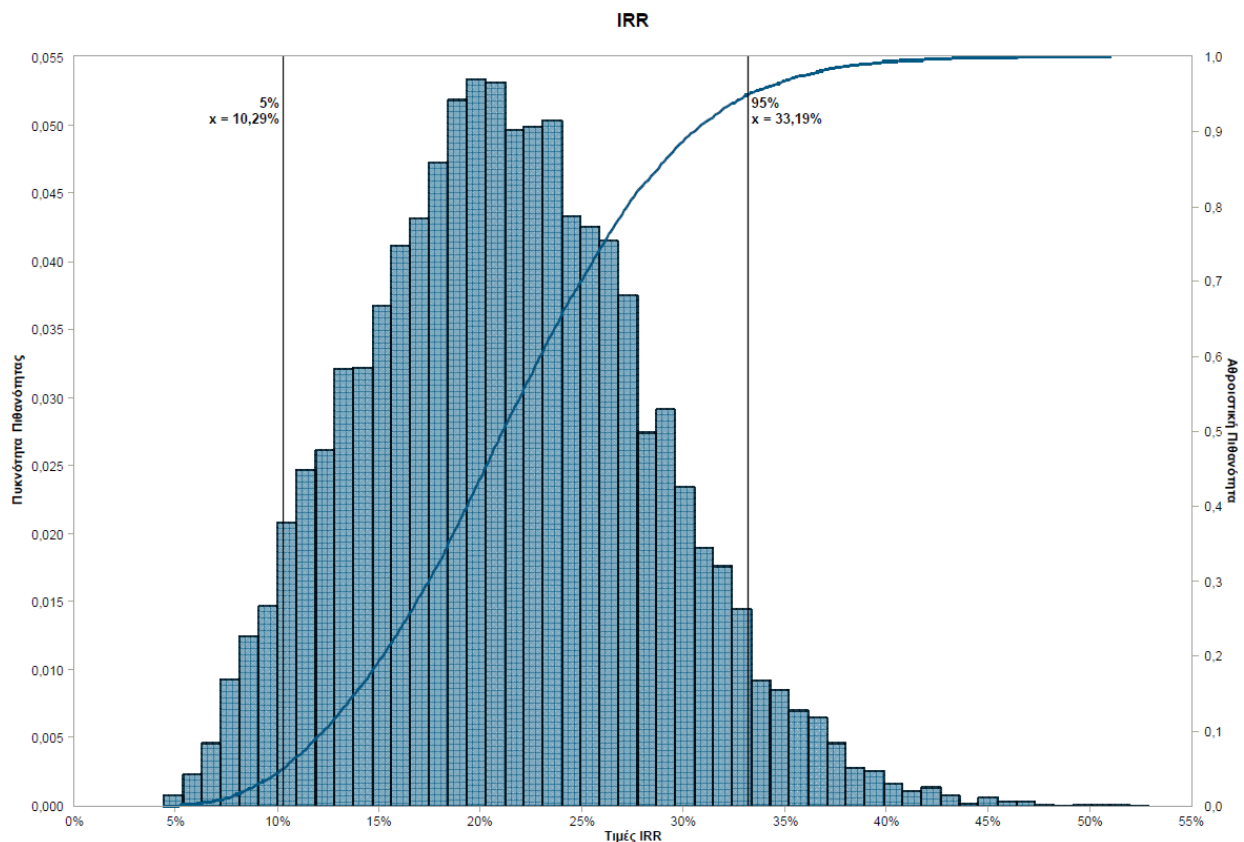
4.4.6.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)



Σχήμα 24: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV)

Η μέση αναμενόμενη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας αναμένεται να είναι 30.336.846,00 € ενώ η μέγιστη προσεγγίζει τα 59.286.551,80 €. Επίσης, προκύπτει ότι με βεβαιότητα 95% η καθαρή παρούσα αξία θα είναι μεγαλύτερη από 13.398.519,99 €.

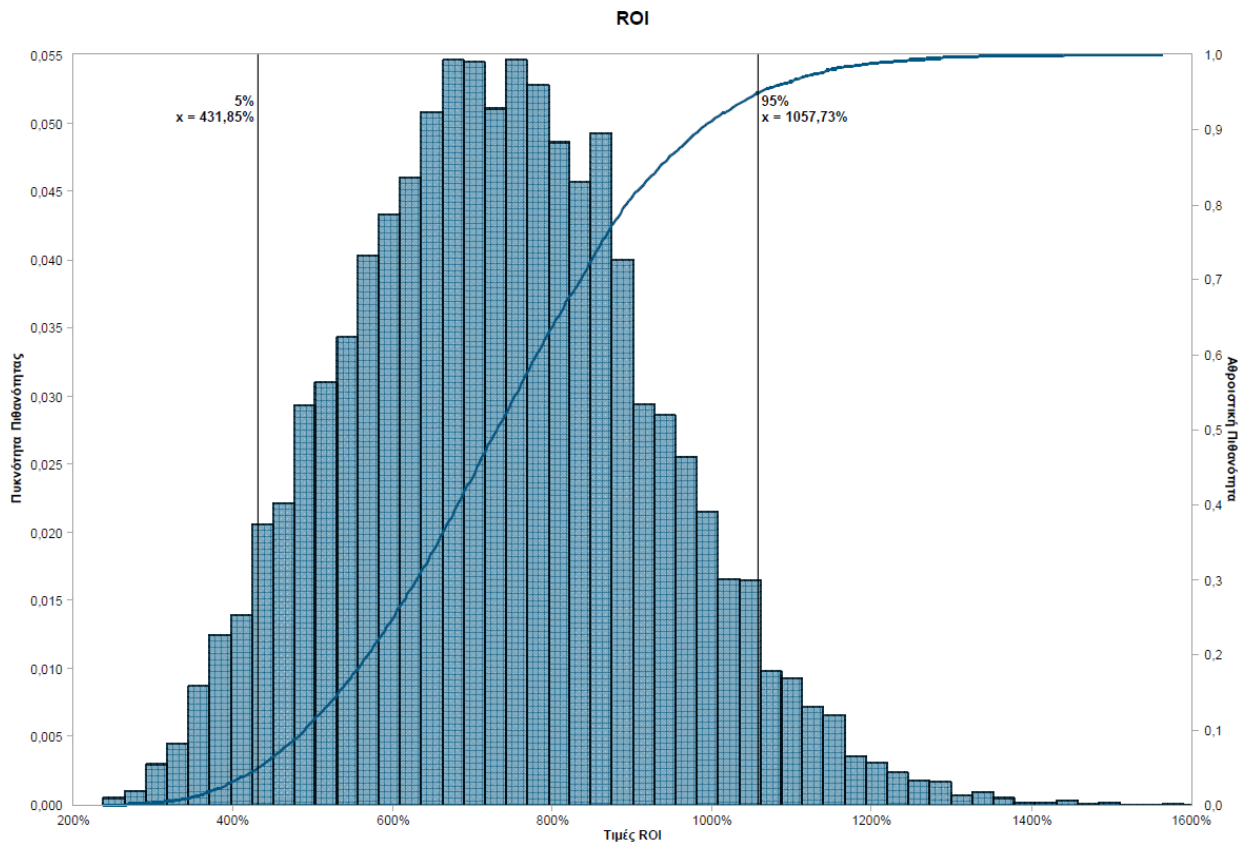
4.4.6.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR)



Σχήμα 25: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR)

Η μέση αναμενόμενη τιμή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης επένδυσης αναμένεται να είναι 21,37 % ενώ η μέγιστη τιμή προσεγγίζει το 51,07 %. Επίσης, προκύπτει ότι με βεβαιότητα 95% ότι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης επένδυσης θα είναι μεγαλύτερος από 10,29 %.

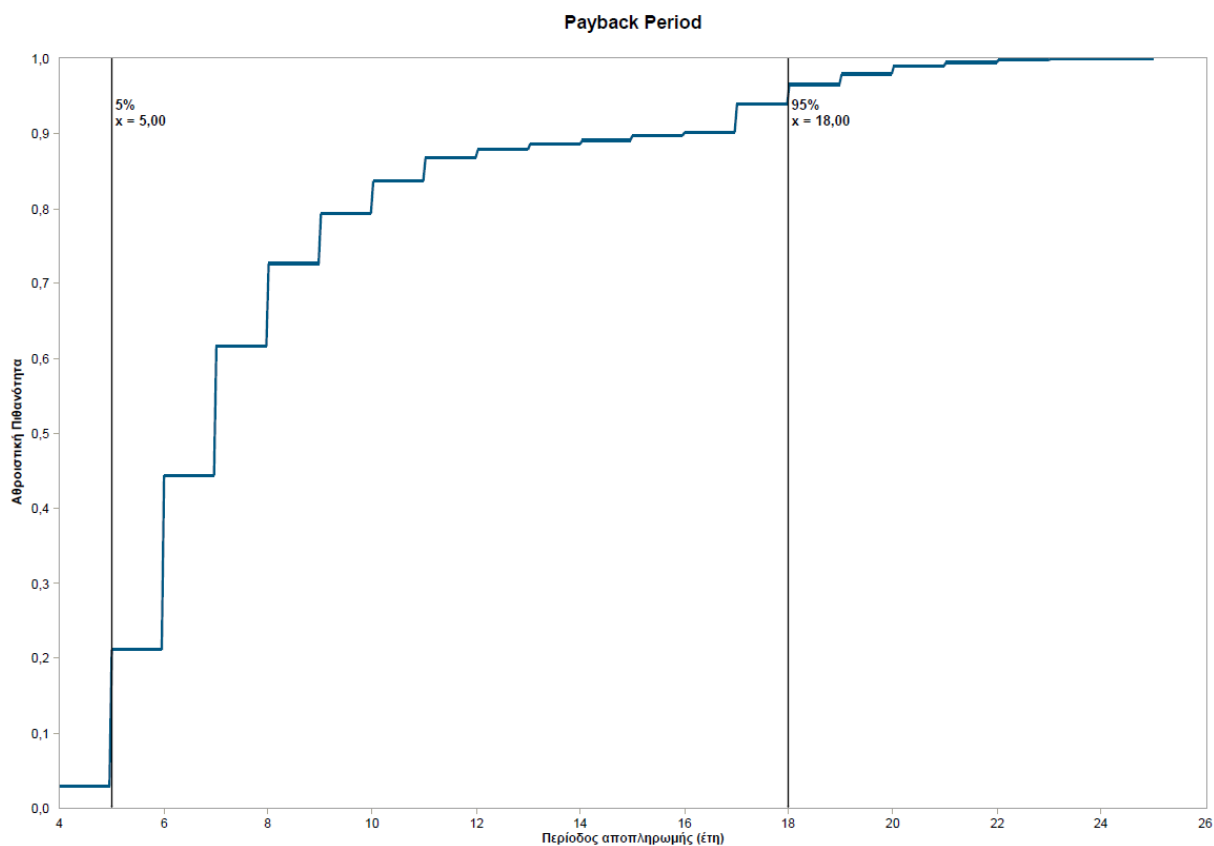
4.4.6.3 Συντελεστής Απόδοσης Επένδυσης (ROI)



Σχήμα 26: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI)

Η μέση αναμενόμενη τιμή του συντελεστή απόδοσης επένδυσης αναμένεται να είναι 736,32% ενώ η μέγιστη τιμή προσεγγίζει το 1564,65%. Επίσης, προκύπτει ότι με βεβαιότητα 95% ο συντελεστής απόδοσης επένδυσης θα είναι μεγαλύτερος από 431,85%.

4.4.6.4 Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period)



Σχήμα 27: Διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας περιόδου αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου (Payback Period)

Η μέση αναμενόμενη τιμή της περιόδου αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου αναμένεται να είναι 8,1481 έτη ενώ η ελάχιστη προσεγγίζει τα 4 έτη. Επίσης, προκύπτει ότι με βεβαιότητα 95% η περίοδος αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου θα είναι μικρότερη από 18 έτη.

5. Συμπεράσματα

Στην πραγματοποιηθείσα εργασία, σκοπός ήταν να διερευνηθεί η οικονομική σκοπιμότητα της επένδυσης για την κατασκευή και τη λειτουργία μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, το οποίο προέρχεται από την αναερόβια χώνευση πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε αν υπάρχει οικονομικό όφελος στο πεδίο της παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο και εάν είναι σκόπιμη η επένδυση για την κατασκευή της εν λόγω μονάδας, δεδομένων των ποσοτήτων αποβλήτων που παράγονται ετησίως στην περιοχή. Η ανάπτυξη του οικονομικού μοντέλου αξιολόγησης της επένδυσης ολοκληρώθηκε επιτυχώς και συνέβαλε καθοριστικά στην εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Η αναζήτηση έγκυρων αριθμητικών δεδομένων για τα στοιχεία του οικονομικού μοντέλου επιτεύχθηκε εν μέρει. Η τάξη μεγέθους των απαιτούμενων αριθμητικών δεδομένων που απαιτούνται για την απόφαση της οικονομικής σκοπιμότητας της επένδυσης υπολογίστηκε επιτυχώς. Ωστόσο, υπήρξαν μεγέθη για τα οποία δεν κατέστη δυνατή η εύρεση δεδομένων υψηλής ακρίβειας. Το πρόβλημα αυτό, βέβαια, αντιμετωπίστηκε με την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας για ένα εύρος τιμών των μεταβλητών αυτών. Η ανάλυση ευαισθησίας αποτέλεσε καθοριστικής σημασίας τμήμα της μελέτης, καθώς, επιβεβαίωσε τη βιωσιμότητα της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των μεγεθών, για τις τιμές των οποίων δεν υπήρχε ακριβής γνώση.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι υπάρχει περιθώριο κέρδους στην παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο, ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετείται το πρόβλημα της διαχείρισης των πτηνοτροφικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων. Επιπλέον, υπάρχει και κοινωνικό όφελος από την κατασκευή και λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο, λόγω της δημιουργίας θέσεων εργασίας.

Ως προς την οικονομοτεχνική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, συμπεραίνεται ότι είναι σκόπιμη η επένδυση για την κατασκευή της εν λόγω μονάδας. Με 20% ίδια συμμετοχή στο κόστος της επένδυσης και με 25ετή διάρκεια, η επένδυση παρουσιάζει καθαρή παρούσα αξία (NPV) ίση με 37.127.414 €, εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR) 25,39 % και συντελεστή απόδοσης επένδυσης (ROI) 842 %, ενώ το αρχικό κεφάλαιο αποπληρώνεται σε 6 έτη από την έναρξη της επένδυσης. Καθοριστική συνεισφορά στα ετήσια έσοδα έχει κυρίως η πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά σημαντικά είναι και τα έσοδα από την πώληση του βιολογικού λιπάσματος που είναι και αυτό παράγωγο της αναερόβιας χώνευσης των αποβλήτων.

Κατάλογος Αναφορών

- Abouelenien, F., Namba, Y., Kosseva, M.R., Nishio, N. and Nakashimada, Y. (2014) 'Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes', *Bioresource Technology*, 159, pp. 80–87. doi:10.1016/j.biortech.2014.02.050.
- Adekunle, K.F. and Okolie, J.A. (2015) 'A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion', (March), pp. 205–212.
- Ahn, H.K., Smith, M.C., Kondrad, S.L. and White, J.W. (2010) 'Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass-animal manure mixtures', *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(4), pp. 965–975. doi:10.1007/s12010-009-8624-x.
- Angelidaki, I., Ahrin, B.K., Deng, H. and Schmidt, J.E. (2002) 'Anaerobic digestion of olive oil mill effluents together with swine manure in UASB reactors.', *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10), pp. 213–218. doi:10.2166/wst.2002.0334.
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. (1993) 'Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 38(4), pp. 560–564. doi:10.1007/BF00242955.
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. (1994) 'Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature', *Water Research*, 28(3), pp. 727–731. doi:https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90153-8.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L. and Kiør, B. (2003) 'Applications of the Anaerobic Digestion Process', 82, pp. 1–33.
- Aslanzadeh, S. (2014) *Pretreatment of cellulosic waste and high-rate biogas production*. Available at: <http://hdl.handle.net/2320/12853>.
- Bachmann, E. (2013) 'Design and engineering of biogas plants', in, pp. 191–211. doi:10.1533/9780857097415.2.191.
- Bi, S., Qiao, W., Xiong, L., Ricci, M., Adani, F. and Dong, R. (2019) 'Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions', *Renewable Energy*, 139, pp. 242–250. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.083.
- Bolzonella, D., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J. and Cecchi, F. (2003) 'Anaerobic digestion of organic solid waste: Process behaviour in transient conditions', *Water Science and Technology*, 48(4), pp. 1–8. doi:10.2166/wst.2003.0207.
- Cavinato, C., Fatone, F., Bolzonella, D. and Pavan, P. (2010) 'Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: Comparison of pilot and full scale

experiences', *Bioresource Technology*, 101(2), pp. 545–550. doi:10.1016/j.biortech.2009.08.043.

Chen, Y., Cheng, J.J. and Creamer, K.S. (2008) 'Inhibition of anaerobic digestion process : A review', 99, pp. 4044–4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057.

Da Costa Gomez, C. (2013) '1 - Biogas as an energy option: an overview', in Wellinger, A., Murphy, J., and Baxter, D.B.T.-T.B.H. (eds) *Woodhead Publishing Series in Energy*. Woodhead Publishing, pp. 1–16. doi:https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.

Cudjoe, D., Nketiah, E., Obuobi, B., Adu-Gyamfi, G., Adjei, M. and Zhu, B. (2021) 'Forecasting the potential and economic feasibility of power generation using biogas from food waste in Ghana: Evidence from Accra and Kumasi', *Energy*, 226, p. 120342. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120342.

Delgenes, J.P., Penaud, V. and Moletta, R. (2003) 'Pretreatments for the Enhancement of Anaerobic Digestion of Solid Wastes', *ChemInform*, 34(13). doi:10.1002/chin.200313271.

Fardin, J.F., de Barros, O. and Dias, A.P.F. (2018) *Biomass: Some Basics and Biogas, Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-813185-5.00001-2.

Feng, X.M., Karlsson, A., Svensson, B.H. and Bertilsson, S. (2010) 'Impact of trace element addition on biogas production from food industrial waste – linking process to microbial communities', *FEMS Microbiology Ecology*, 74(1), pp. 226–240. doi:10.1111/j.1574-6941.2010.00932.x.

Fukuhara, S. (2012) *A basis for the space of modular forms, Acta Arithmetica*. doi:10.4064/aa151-4-5.

Georgiou, D., Liliopoulos, V. and Aivasidis, A. (2020) 'Journal of Water Process Engineering Upgrading of biogas by utilizing aqueous ammonia and the alkaline effluent from air-stripping of anaerobically digested animal manure . Application on the design of a semi-industrial plant unit', *Journal of Water Process Engineering*, 36(January), p. 101318. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101318.

Ghaem Sigarchian, S., Paleta, R., Malmquist, A. and Pina, A. (2015) 'Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system – Case study Kenya', *Energy*, 90, pp. 1830–1841. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.008.

Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T. and Oleskowicz-Popiel, P. (2009) 'The future of anaerobic digestion and biogas utilization', *Bioresource Technology*, 100(22), pp. 5478–5484. doi:10.1016/j.biortech.2008.12.046.

Ileleji, K.E., Martin, C. and Jones, D. (2015) ‘Chapter 17 - Basics of Energy Production through Anaerobic Digestion of Livestock Manure’, in Dahiya, A.B.T.-B. (ed.). Boston: Academic Press, pp. 287–295. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00017-1>.

Jain, Siddharth, Jain, Shivani, Tim, I., Lee, J. and Wah, Y. (2015) ‘A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, pp. 142–154. doi:[10.1016/j.rser.2015.07.091](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.091).

Kalaiselvan, N., Glivin, G., Bakthavatsalam, A.K., Mariappan, V., Premalatha, M., Raveendran, P.S., Jayaraj, S. and Sekhar, S.J. (2022) ‘A waste to energy technology for Enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges’, *Chemosphere*, 293, p. 133486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133486>.

Kasinath, A., Fudala-ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-skwarek, A. and Luczkiewicz, A. (2021) ‘Biomass in biogas production : Pretreatment and codigestion’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, p. 111509. doi:[10.1016/j.rser.2021.111509](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509).

Kavalopoulos, M., Stoumpou, V., Christo, A., Barampouti, E.M., Moustakas, K., Malamis, D. and Loizidou, M. (2021) ‘Sustainable valorisation pathways mitigating environmental pollution from brewers’ spent grains *’, 270. doi:[10.1016/j.envpol.2020.116069](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116069).

Khalil, M., Ali, M., Heryanto, R. and Rizalie, A. (2019) ‘Waste to energy technology : The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(February), pp. 323–331. doi:[10.1016/j.rser.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.011).

Khoshgoftar Manesh, M.H., Rezazadeh, A. and Kabiri, S. (2020) ‘A feasibility study on the potential, economic, and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran’, *Renewable Energy*, 159, pp. 87–106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.173>.

Kirim, Y., Sadikoglu, H. and Melikoglu, M. (2022) ‘Technical and economic analysis of biogas and solar photovoltaic (PV) hybrid renewable energy system for dairy cattle barns’, *Renewable Energy*, 188, pp. 873–889. doi:[10.1016/j.renene.2022.02.082](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.082).

Lu, J. and Gao, X. (2021) ‘Biogas: Potential, challenges, and perspectives in a changing China’, *Biomass and Bioenergy*, 150(January), p. 106127. doi:[10.1016/j.biombioe.2021.106127](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106127).

Manesh, M.H.K., Rezazadeh, A. and Kabiri, S. (2020) ‘A feasibility study on the potential , economic , and environmental advantages of biogas production from poultry manure in Iran’, *Renewable Energy*, 159, pp. 87–106. doi:[10.1016/j.renene.2020.05.173](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.173).

Mao, C., Feng, Y., Wang, X. and Ren, G. (2015) ‘Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 540–555.

doi:10.1016/j.rser.2015.02.032.

Mohammed, M., Egyir, I.S., Donkor, A.K., Amoah, P., Nyarko, S., Boateng, K.K. and Ziwu, C. (2017) 'Feasibility study for biogas integration into waste treatment plants in Ghana', *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3), pp. 695–703. doi:10.1016/j.ejpe.2016.10.004.

Muhammad, M.B. and Chandra, R. (2022) 'Turning neem leaves anti-microbial substrate to methane-producing co-substrate for the generation of clean and affordable electricity through biogas: A case study', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, p. 101982. doi:https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101982.

Murphy, J.D. and Thanasit Thamsiroj (2013) '5 - Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production', in Wellinger, A., Murphy, J., and Baxter, D.B.T.-T.B.H. (eds) *Woodhead Publishing Series in Energy*. Woodhead Publishing, pp. 104–130. doi:https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.104.

Muth, C.J., Aalto, P., Mylläri, F., Rönkkö, T. and Harsia, P. (2021) 'Chapter 2 - Globally and locally applicable technologies to accelerate electrification', in Aalto, P.B.T.-E. (ed.). Academic Press, pp. 25–55. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822143-3.00005-6.

Park, J., Lee, B., Park, H. and Jun, H. (2019) 'Bioresource Technology Long-term evaluation of methane production in a bio-electrochemical anaerobic digestion reactor according to the organic loading rate', *Bioresource Technology*, 273(November 2018), pp. 478–486. doi:10.1016/j.biortech.2018.11.021.

Renda, R., Gigli, E., Cappelli, A., Simoni, S., Guerriero, E. and Romagnoli, F. (2016) 'Economic Feasibility Study of a Small-scale Biogas Plant Using a Two-stage Process and a Fixed Bio-film Reactor for a Cost-efficient Production', *Energy Procedia*, 95, pp. 385–392. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.042.

Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., Tambone, F., Imporzano, G.D. and Adani, F. (2016) 'Science of the Total Environment Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer : Agronomic performance , odours , and ammonia emission impacts', *Science of the Total Environment*, The, 547, pp. 206–214. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.156.

Samer, M., Abdelaziz, S., Refai, M. and Abdelsalam, E. (2020) 'Techno-economic assessment of dry fermentation in household biogas units through co-digestion of manure and agricultural crop residues in Egypt', *Renewable Energy*, 149, pp. 226–234. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.058.

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. and Janssen, R. (2008) *Biogas handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg.

Sofokleous, M., Christofi, A., Malamis, D., Mai, S. and Barampouti, E.M. (2022) 'Chemosphere

Bioethanol and biogas production : an alternative valorisation pathway for green waste’, *Chemosphere*, 296(January), p. 133970. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133970.

TG, I., Haq, I. and Kalamdhad, A.S. (2022) ‘14 - Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review’, in Hussain, C. and Hait, S.B.T.-A.O.W.M. (eds). Elsevier, pp. 223–233. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4.

Tian, H., Mancini, E., Treu, L., Angelidaki, I. and Fotidis, I.A. (2019) ‘Bioaugmentation strategy for overcoming ammonia inhibition during biomethanation of a protein-rich substrate’, *Chemosphere*, 231, pp. 415–422. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.140.

Tsagarakis, K.P. and Papadogiannis, C. (2006) ‘Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio Municipality, Greece’, *Energy Conversion and Management*, 47(7–8), pp. 844–857. doi:10.1016/j.enconman.2005.06.017.

Vlyssides, A., Mai, S. and Barampouti, E.M. (2015) ‘Energy Generation Potential in Greece From Agricultural Residues and Livestock Manure by Anaerobic Digestion Technology’, *Waste and Biomass Valorization*, 6(5), pp. 747–757. doi:10.1007/s12649-015-9400-5.

Vyas, S., Prajapati, P., Shah, A. V, Kumar, V. and Varjani, S. (2022) ‘Opportunities and knowledge gaps in biochemical interventions for mining of resources from solid waste : A special focus on anaerobic digestion’, *Fuel*, 311(November 2021), p. 122625. doi:10.1016/j.fuel.2021.122625.

Wahono, S.K., Maryana, R. and Kismurtono, M. (2009) ‘Biogas purification process to increase gen - Set efficiency’, *AIP Conference Proceedings*, 1169(November), pp. 185–189. doi:10.1063/1.3243250.

Weiland, P. (2010) ‘Biogas production: current state and perspectives’, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), pp. 849–860. doi:10.1007/s00253-009-2246-7.

Wijffels, R.H., Barten, H. and Reith, R.H. (2003) *Bio-methane & Biohydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. Dutch Biological Hydrogen Foundation.

Xu, J., Liu, Z. and Dai, J. (2021) ‘Environmental and economic trade-off-based approaches towards urban household waste and crop straw disposal for biogas power generation project - a case study from China’, *Journal of Cleaner Production*, 319(August), p. 128620. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128620.

Yang, Y., Zang, Y., Hu, Y., Wang, X.C. and Hao, H. (2020) ‘Up fl ow anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment at room temperature and short HRTs : Process characteristics and practical applicability’, *Chemical Engineering Journal*, 383(October 2019), p. 123186. doi:10.1016/j.cej.2019.123186.

Yenigün, O. and Demirel, B. (2013) ‘Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review’,

Process Biochemistry, 48(5–6), pp. 901–911. doi:10.1016/j.procbio.2013.04.012.

Zamri, M.F.M.A., Hasmady, S., Akhlar, A., Ideris, F., Shamsuddin, A.H., Mofijur, M., Fattah, I.M.R. and Mahlia, T.M.I. (2021) 'A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137(May 2020), p. 110637. doi:10.1016/j.rser.2020.110637.

Λιαντινώτη, Κ.Θ. (2011) *Διερεύνηση δυνατοτήτων παραγωγής και αξιοποίησης βιοαερίου στην περιοχή του Μετσόβου*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. doi:10.26240/heal.ntua.1785.

Παπαζηλάκης, Χ. (2013) *Τεχνο - οικονομική μελέτη για μονάδα παραγωγής βιοαερίου σε αγελαδοτροφική μονάδα*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. doi:10.26240/heal.ntua.4181.

Νόμος υπ' αριθ. 3851 (ΦΕΚ Α' 85/4-6-2010), Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής

Νόμος υπ' αριθ. 4172 (ΦΕΚ Α' 167/23-07-2013), Φορολογία εισοδήματος, επείγοντα μέτρα εφαρμογής του ν. 4046/2012, του ν. 4093/2012 και του ν. 4127/2013 και άλλες διατάξεις, 2013

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μερικών υποστρωμάτων κατάλληλων για αναερόβια χώνευση ...	11
Πίνακας 2: Σύνθεση του βιοαερίου	19
Πίνακας 3: Παραγωγή μεθανίου και βιοαερίου για διάφορους τύπους α΄ ύλης	19
Πίνακας 4: Μελέτες και εργασίες διερεύνησης της οικονομικής σκοπιμότητας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο	23
Πίνακας 5: Παραγωγή βιοαερίου	30
Πίνακας 6: Κόστος επένδυσης	31
Πίνακας 7: Χρηματοδότηση επένδυσης	31
Πίνακας 8: Υπολογισμός δανείου	31
Πίνακας 9: Κόστος λειτουργίας	33
Πίνακας 10: Αποσβέσεις	33
Πίνακας 11: Σύνολο απόσβεσης κατά έτος	34
Πίνακας 12: Ανάλυση εσόδων κατά έτος	35
Πίνακας 13: Ετήσιες χρηματοροές	37
Πίνακας 14: Ανάλυση ευαισθησίας για το κόστος επένδυσης	40
Πίνακας 15: Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων	43
Πίνακας 16: Ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή πώλησης βιολογικού λιπάσματος	46
Πίνακας 17: Ανάλυση ευαισθησίας για τον συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	50
Πίνακας 18: Ανάλυση ευαισθησίας για το ποσοστό χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια.....	52
Πίνακας 19: Μεταβλητές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε συνδυαστική ανάλυση ευαισθησίας με προσομοίωση Monte Carlo	56

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα ετήσιας παραγωγής βιοαερίου και καθαρής παρούσας αξίας επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο.....	25
Σχήμα 2: Διάγραμμα διαχρονικής απόδοσης επενδύσεων για την παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο.....	26
Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής εργασίας.....	28
Σχήμα 4: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης.....	41
Σχήμα 5: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης.....	41
Σχήμα 6: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης.....	42
Σχήμα 7: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του κόστους επένδυσης.....	43
Σχήμα 8: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων.....	44
Σχήμα 9: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων.....	45
Σχήμα 10: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων.....	45
Σχήμα 11: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή αξιοποίησης αποβλήτων.....	46
Σχήμα 12: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος.....	47
Σχήμα 13: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος.....	48
Σχήμα 14: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος.....	48
Σχήμα 15: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές της τιμής πώλησης βιολογικού λιπάσματος.....	49
Σχήμα 16: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	50
Σχήμα 17: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	51
Σχήμα 18: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	51
Σχήμα 19: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του συντελεστή απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	52

Σχήμα 20: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια	53
Σχήμα 21: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια	54
Σχήμα 22: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια	54
Σχήμα 23: Διάγραμμα Περιόδου Αποπληρωμής Κεφαλαίου (Payback Period) ως προς τις μεταβολές του ποσοστού χρηματοδότησης της επένδυσης από ίδια κεφάλαια	55
Σχήμα 24: Διάγραμμα Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV).....	57
Σχήμα 25: Διάγραμμα Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR)	58
Σχήμα 26: Διάγραμμα Συντελεστή Απόδοσης Επένδυσης (ROI).....	59
Σχήμα 27: Διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας περιόδου αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου (Payback Period)	60